



**Faculté :** Faculté des Sciences de l'Ingénierat  
**Département :** électromécanique  
**Domaine :** science et technologie  
**Filière :** électromécanique  
**Spécialité :** maintenance industriel

## Mémoire

**Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master**

**Thème:**

**Détection et localisation des défauts des installations  
Photovoltaïques**

**Présenté par :** *NECIB Nedjme eddine*

**Encadrant :** *Mr. OUADA Mehdi*

*MCB*

*UBM Annaba*

### Jury de Soutenance :

MENASRIA Yamina	MCA	UBMA	Président
OUADA Mehdi	MCB	UBMA	Encadreur
BENAMIRA Nadir	MCB	UBMA	Examineur

**Année Universitaire : 2019/2020**

## *REMERCIEMENTS*

*Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail*

*Nous tenons à remercier mon encadreur Mr.ouada mehdi d'avoir posé un sujet très intéressant et pour leurs conseils, leur disponibilité et pour avoir fait profiter de leurs connaissances et de leurs qualités tant professionnelles qu'humaines.*

*ainsi que le membre du jury qui m'ont l'honneur d'examiner ce travail.*

# **JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL :**

**À MES TRÈS CHERS PARENTS, QUE DIEU LES GARDE ET LES  
PROTÈGE POUR LEURS SOUTIEN MORAL ET FINANCIER, POUR  
LEURS ENCOURAGEMENTS ET LES SACRIFICES QU'ILS ONT  
ENDURÉS.**

**MA MÈRE**

**À MES SŒURS**

**MON FRÈRE MAHMOUD**

**AUX CHERS AMIS SURTOUTS**

**ISLEM ET LES DEUX ABDERRAHIM'S**

**À TOUS CE QUE J'AIME ET QUI M'AIMENT**

**À TOUS MES COLLÈGUES D'ÉTUDES SURTOUT CEUX  
D'ÉLECTROMÉCANIQUE**

## الخلاصة :

الغرض من هذا العمل هو دراسة و تحديد موقع الأعطال في المولد الكهروضوئي . و لكن قبل الوصول للفصل الأخير الذي يتحدث عن طرق تشخيص هذه الأعطال مررنا بثلاثة فصول . الأول يتحدث عن حالة الفن للطاقة الشمسية و طرق استخدامها ، بعد ذلك شرحنا في الفصل الثاني الطريقة التي تهتمنا أكثر التي هي متصلة بالشبكة ، و خصصنا الفصل الثالث لنمذجة المولد الكهروضوئي في حالت خلوه من اي عطل باستعمال برنامج ماتلاب .

أخيرا ، في الجزء الأول من الفصل الأخير ، بدأنا أولا بعرض أعطال النظام الشمسي ، و في الجزء الثاني شرحنا طرق الكشف عن أعطال هذا النظام مع شرح مبادئ تشغيلها ، في الجزء الأخير من الفصل الأخير و بمساعدة النمذجة و الخصائص المقدمة في الفصل الثالث تمكنا من مقارنة السلوك الصحي مع نظام يحتوي على أعطال مختلفة عن طريق البرنامج ماتلاب

الكلمات المفتاحية : الكهروضوئية ، النمذجة ، المحاكاة ، الكشف ، الأعطال

## Résumé :

Ce travail a pour objet l'étude d'identification et de localisation des défauts d'un générateur photovoltaïque. Mais avant d'arriver au dernier chapitre qui parle de diagnostics des défauts, on a passé par trois autres chapitres , le premier parle de l'état de l'art de l'énergie solaire et ses méthode d'utilisation .Ensuite, dans le deuxième chapitre on a expliqué le mode qui nous intéresse le plus celui qui est connecté au réseau , le troisième chapitre était consacré pour la modélisation de générateur photovoltaïque sain réalisé par le MATLAB/SIMULINK. Enfin, dans le dernier chapitre dans une première partie on a commencé par la présentation des défauts du système solaire , dans la 2ème partie on a expliqué les méthodes de détections de défauts de ce système avec les principes de fonctionnements , et dans la dernière partie de ce dernier chapitre a l'aide de la modélisation et les caractéristiques présenté dans le 3ème chapitre ;Nous avons pu comparer entre le comportement sain avec un système qui contient un défaut par simulation sous MATLAB/SIMULINK.

Mots clé : photovoltaïque , modélisation , simulation , détection ,défauts

## Abstract :

The purpose of this work is to study the identification and location of faults in a photovoltaic generator. To do this, we used the characteristic IV method of detecting PV generator protection faults, but before discussing the last chapter which talks about diagnostics fault, we went through three other chapters, the first talking about the state. of the art of solar energy and its method of use. Then, in the second chapter we explained the mode that interests us the most that which is connected to the network, the third chapter was devoted to the modeling of photovoltaic generator sound produced by MATLAB / SIMULINK. Finally, in the last chapter in the first part westartedwith the presentation of solarfaults, in the 2nd part we explained the detection methods of its faults with the operating principles, and in the last part of this last chapter using the modelization and the characteristics presented in the 3rd chapter; We were able to compare between the healthy behavior with a system which contains a default by simulation under MATLAB / SIMULINK.

**Keywords:** photovoltaic, modeling, simulation, detection, faults

# Sommaire

## Chapitre I : état de l'art sur les installations PV :

- Introduction.....
- I.1.Historique.....
- I.2.L'effet photoélectrique.....
- I.3.Rayonnement solaire.....
  - I.3.1.Rayonnement solaire direct.....
  - I.3.2. Rayonnement solaire diffus.....
  - I.3.3.L'albédo.....
- I.4 Énergie solaire .....
  - I.4.1. Energie solaire thermique .....
  - I.4.2.Energie photovoltaïque .....
- I.5. Modes d'utilisation d'un système solaire photovoltaïque.....
  - I.5.1 Système autonome .....
  - I. 5.2 Système hybride.....
  - I.5.3 Système PV raccordée au réseau.....
- I.6.Avantages de l'énergie photovoltaïque.....
- I.7.Inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....
- I.8. L'irradiation solaire.....
- Conclusion.....

## Chapitre II : conversion photovoltaïque :

- II.1 Introduction .....
- II.2 Chaîne de conversion d'un système photovoltaïque .....
- II.2.1. Générateur photovoltaïque.....
  - II.2.1.1. Cellule PV.....
    - a- Cellules cristallin.....
    - b-Cellule amorphe.....
    - c- Avantages et inconvénients de différentes catégories de cellules.....

II.2.1.2. Module photovoltaïque.....	
II.2.1.3. Champ PV .....	
- II.2.2. Les convertisseurs.....	
- II.2.3. Câblage et boîte de jonction.....	
- II.2.4. Système de protection.....	
II.2.4.1. Diode de by-pass.....	
II.2.4.2. Diode anti-retour .....	
II.3. Conclusion.....	

## **Chapitre III : modélisation :**

III.1. Introduction .....	
III.2. Modélisation de la cellule solaire .....	
III.2.1 Modèle à une seule diode .....	
III.3. Conclusion.....	

## **Chapitre IIII : défauts et méthodes de diagnostic :**

IIII.1. introduction .....	
IIII.2. Défauts de fonctionnement d'un générateur PV .....	
IIII.2.1. Classification des défauts de générateur PV .....	
IIII.3. Défaut des systèmes PV sur le réseau de distribution .....	
IIII.4. Méthodes de diagnostic .....	
-IIII.4.1. Méthode d'infrarouge.....	
....IIII.4.1.1.Principe de fonctionnement .....	
....IIII.4.1.2.Avantages de la thermographie infrarouge.....	
....IIII.4.1.3. inconvénients.....	
-IIII.4.2. Méthode électrique .....	
-IIII.4.3. Méthode de réflectométrie .....	
....IIII.4.3.1. Principe de fonctionnement de la reflectométrie .....	
-IIII.4.4. Méthode d'analyse du point de fonctionnement.....	
IIII.5.conclusion.....	

# Liste des figures

- Figure I-1. Caractéristique spectrale du soleil
- Figure I-2. Energie solaire thermique
- Figure I-3. Champ photovoltaïque
- Figure I-4. Structure d'un système PV autonome
- Figure I-5. Exemple de la structure d'un système PV hybride
- Figure I-6. Structure d'un système PV raccordée au réseau
- Figure I.7. Irradiation solaire mondiale moyenne annuelle [KW/m<sup>2</sup>]
- Figure II-1 : Chaîne de conversion d'énergie d'un système PV connecté au réseau
- Figure II- 2: Schéma de l'effet photovoltaïque sous illumination
- Figure II- 3: Cellule au silicium monocristallin et cellule au silicium polycristallin
- Figure II.4. Cellule amorphe
- Figure II- 5: Répartition de la production de cellules par technologie
- Figure II.4. Cellule amorphe
- Figure II- 6: Mise en série de cellules PV dans le module avec les deux diodes by-pass
- figure II-7 : Structure d'un panneau photovoltaïque face avant et face arrière
- Figure II- 8: Exemple de structure de champ photovoltaïque
- Figure II- 9: convertisseur installé dans un système PV
- Figure II.10: Exemple de boîte de jonction et câblage
- Figure II- 11: représentation des deux diodes by-pass dans un module PV
- Figure II. 12: Protection avec une diode anti-retour
- Figure III.1. Caractéristique électrique d'une cellule solaire
- Figure III.2. Modèle d'une cellule photovoltaïque
- Figure III.3.a. Influence de l'ensoleillement caractéristique P-V du module.
- Figure III.3.b influence de l'ensoleillement sur caractéristique P-V du module
- Figure III.4.a. Influence de température caractéristique I-V du module.
- Figure III.4.b. Influence de température caractéristique P-V du module.
- Figure III.5. Influence de la résistance série sur caractéristique P-V du module.
- Figure III.6. Influence de la résistance shunt sur caractéristique I-V du module.
- Figure III.7.a influence du nombre de module parallèle sur la caractéristique I-V
- Figure III.7.b. Influence de la nombre de module parallèle caractéristique P –V
- Figure III. 8.a. influence de la nombre de module série sur caractéristique I-V.
- Figure III. 8.b. influence de la nombre de module série sur caractéristique P-V.
- Figure III.1. Taux de dégradation d'un module PV par an
- Figure III.2. Exemple de détection de défauts par thermographie infrarouge (thermogramme)
- Figure. III.3. Principe de fonctionnement de la caméra infrarouge.
- Figure. III.4. principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV
- Figure. III.5. bloc de simulation MATLAB / SIMULINK
- Figure. III.6. Comparaison entre les caractéristiques P-V dans le cas uniforme et le déséquilibre
- Figure. III.7. Comparaison entre les caractéristiques I -V dans le cas uniforme et de l'équilibre



Figure. III.8. Schéma bloc d'un groupe de cellules PV avec la diode de bypass défaillant  
Figure. III.9. Bloc de simulation mauvaise protection (diode by-pass)  
Figure. III.10. résultat de simulation et élimination un diode bypass  
Figure. III.11. résultat de simulation et élimination 2 diode bypass  
Figure. III.12. Schéma bloc d'un module PV défaillant  
Figure. III.13. Résultats de simulation de diode anti retour déconnectée

### **Liste des Tableaux :**

Tableau 2. 1 : Avantages et inconvénients des cellules solaires à base de silicium

Tableau 4. 1: Différents défauts du GPV .

Tableau 4. 2: Classification des défauts et les anomalies d'un GPV .

## **Introduction Générale :**

Au cours des dix dernières années, le marché du photovoltaïque a connu une croissance très remarquable, surtout dans les quelques dernières années grâce aux différents facteurs stimulants : réduction des coûts de production et politiques de soutien. Ces facteurs stimulants rendent le retour sur investissement d'une installation photovoltaïque de plus en plus intéressant. Or, comme tous les autres processus industriels, un système photovoltaïque peut être soumis au cours de son fonctionnement à différents défauts et anomalies conduisant à une baisse de la performance du système et voire à l'indisponibilité totale du système. Toutes ces conséquences défavorables vont évidemment réduire la productivité de l'installation, et donc réduire le profit de l'installation, sans compter le coût de maintenance pour remettre le système en état normal.

Permettre de diagnostiquer finement et de faire de la détection et de localisation de défauts dans une installation PV réduit les coûts de maintenance et surtout augmente la productivité en augmentant le taux de disponibilité des installations en veillant à ce que leur rendement soit optimal. L'ajout de fonctions avancées de surveillance, de diagnostic et de supervision ne devra pas être ressenti par l'acheteur. L'objectif de ce projet est de proposer un système intégré permettant de détecter et de localiser les défauts dans des installations PV. L'idée est de fournir un « service » aux utilisateurs pour superviser et diagnostiquer leurs installations.

Dans ce travail, nous nous intéressons spécifiquement à la détection et la localisation de défauts côté DC du système PV, c'est-à-dire du côté générateur PV. A l'heure actuelle, il existe des systèmes de monitoring qui permettent de calculer la puissance fournie par les panneaux et l'énergie associée par l'intermédiaire de capteurs de tension et de courant. Il existe même des services qui permettent de faire la corrélation entre la production d'une installation et les conditions météorologiques. Un satellite mesure l'ensoleillement émis sur le site et compare avec la productivité du champ. Les informations sont mensuelles et lorsqu'un écart important apparaît, l'utilisateur est informé. Ce genre de service est une première étape intéressante vers une supervision précise de l'installation mais montre des limites car il ne permet pas de détecter et localiser dans un temps bref suite à l'apparition d'un défaut quelconque.

Pour arriver aux objectifs de l'étude, nous avons structuré le mémoire en quatre chapitres :

**Chapitre 1 :** concerne l'état de l'art photovoltaïque avec la présentation de modes d'utilisation .

**Chapitre 2:** concerne la partie théorique et principe de fonctionnement d'une cellule, module et générateur photovoltaïque et le système de la protection aussi.

**Chapitre 3 :** un chapitre qui parle de la modélisation mathématique décrivant le comportement d'un générateur sain.

**Chapitre 4 :** Nous avons décrit dans ce dernier chapitre les différents défauts et anomalies très fréquents associés à ces composants PV avec des méthodes de diagnostics des défauts

# Chapitre I

Etat de l'art sur les  
installations PV

## **Introduction :**

Les énergies fossiles sont considérées comme épuisables à l'échelle humaine, Ces ressources sont limitées, par contre qu'une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvele assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. La conversion de la lumière émise par le soleil en électricité, est appelée effet photovoltaïque. L'énergie solaire est captée par des cellules photovoltaïques, dont le rôle est de produire de l'électricité lorsqu'elle est exposée au rayonnement solaire. Plusieurs cellules peuvent être connectées entre elle pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. Ce chapitre présente un état de l'art recensant les travaux liés aux panneaux solaires sur lesquels nous nous sommes appuyés

### **I.1.Historique :**

L'effet photovoltaïque a été découvert par Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les années 50 pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie. Les images satellites reçues par votre téléviseur ne vous parviennent que grâce à l'énergie photovoltaïque. Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. La croissance de l'industrie fut spectaculaire. Depuis le début des années 80, la quantité de modules photovoltaïques expédiés par an (mesurés en MW-Crêtes) a augmenté et le prix des modules (par Watt-Crête) diminuait au fur et à mesure que le nombre de modules fabriqués augmentait. Bien que le prix se soit quelque peu stabilisé, la quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année continue d'augmenter.

### **I.2. L'effet photoélectrique :**

Lorsqu'un matériau est exposé au rayonnement du soleil, ses atomes sont " bombardés " par les photons constituant la lumière. Sous l'action de ce bombardement, les électrons de valence (électrons des couches électroniques externes) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est directement transformée en énergie électrique : ce phénomène physique est appelé *effet photovoltaïque* où *photoélectrique*.

Le terme photovoltaïque vient du mot grec *photos* qui désigne la lumière et de *voltaïque* mot dérivé du physicien italien *Alessandro VOLTA*. [17]

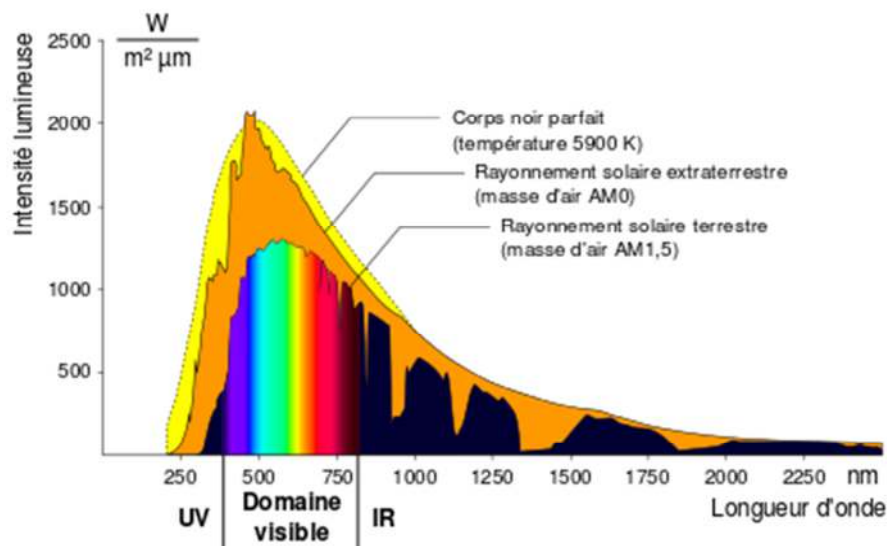
### **I.3. Rayonnement solaire :**

La Terre est située à 150 millions de km du Soleil. Celui-ci émet en permanence 1026 Watt sous forme de rayonnement et la Terre reçoit 178 millions de milliard de Watt sur sa face éclairée soit 350 Watt par m<sup>2</sup> à l'équateur. Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique composé essentiellement:

- De lumière visible de longueur d'onde comprise entre 400nm et 800 nm ;
- De rayonnement infra rouge (IR) de longueur d'onde inférieure à 400 nm ;
- De rayonnement ultra violet (UV) de longueur d'onde supérieure à 800nm. [7]

Sur Terre, l'atmosphère (via le dioxyde de carbone, l'ozone, la vapeur d'eau...) absorbe en grande partie les IR et les UV et un peu la lumière visible. Ainsi plus l'épaisseur d'atmosphère traversée est importante, plus la quantité d'énergie solaire reçue par le sol est faible. Quand on se rapproche des pôles, les rayons sont plus inclinés : la même quantité d'énergie se répartie sur une plus grande surface. C'est pourquoi le rayonnement solaire par unité de surface reçu diminue de l'équateur vers les pôles (ceci, avec l'inclinaison de l'axe de la Terre, est à l'origine du phénomène des saisons). L'énergie solaire est également réduite:

- par la variation saisonnière
- par l'alternance des jours et des nuits ;
- par la couverture nuageuse (celle-ci réduit à 50 % l'énergie solaire) ;[17]



**Figure I-1.** Caractéristiques spectrales du soleil

. Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant une énergie qui est donnée par la relation suivante :

$$E = h\nu = hc / \lambda \quad (Eq. I.1)$$

E : Énergie en Joule.

$\lambda$ : Longueur d'onde en  $\mu m$ .

$\nu$ : Fréquence des photons en Hz.

C : vitesse de la lumière m.s-1.

Généralement on exprime l'énergie des photons E en électron-volts [eV].

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de

1,37kW/m<sup>2</sup>, à plus ou moins 3%, selon que la Terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. [8]

Le rayonnement global comprend trois composantes:

**I.3.1. Rayonnement solaire direct:** Le rayonnement solaire reçu directement du soleil. Ses rayonnements sont généralement parallèles entre eux.

**I.3.2. Rayonnement solaire diffus :** généré par la lumière diffusée l'atmosphère, dépend des conditions météorologiques

**I.3.3. L'albédo :** ses rayons représentent la partie réfléchi par le sol, ils dépendent de quelques paramètres tels que la neige, l'environnement de site... etc.ons météorologiques.[3]

#### **I.4 Énergie solaire :**

Deux grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court se distinguent

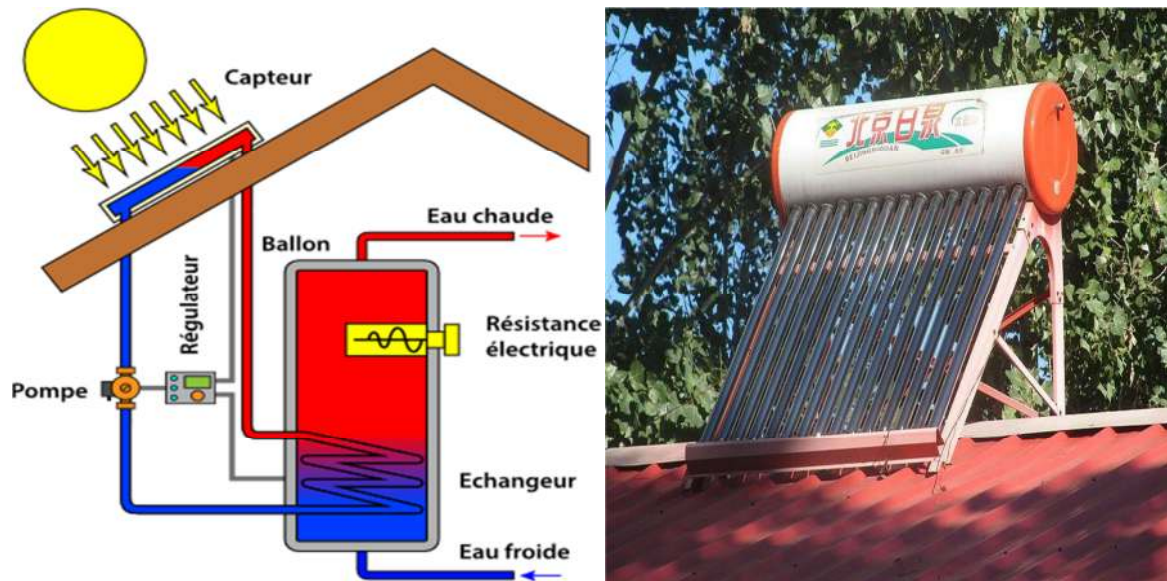
- L'énergie solaire thermique, utilisation de la chaleur transmise par rayonnement.
- L'énergie photovoltaïque, utilisation du rayonnement lui même pour produire de l'électricité .[3]

##### **1.4.1. Energie solaire thermique :**

L'énergie thermique peut être utilisée directement ou indirectement

- directement pour chauffer des locaux ou de l'eau sanitaire (serres, architecture bioclimatique, panneaux solaires chauffants et chauffe-eau solaire) ou des aliments (fours solaires),
- indirectement pour la production de vapeur d'un fluide caloporteur pour entraîner des turbines et ainsi, obtenir une énergie électrique (énergie solaire thermodynamique (ou *hélío thermodynamique*)).

La radiation directe du soleil est concentrée par un collecteur sur un échangeur où elle est cédée à un fluide, soit vaporisé directement, soit transportant la chaleur à un générateur de vapeur. Tous les systèmes ont en commun un certain nombre d'organes : un collecteur qui concentre la chaleur, un liquide ou un gaz caloporteur qui la transporte jusqu'à un point d'extraction, un évaporateur, un condenseur, une turbine et un alternateur.[3]



**Figure I-2. :** *Energie solaire thermique*

#### **I.4.2. Energie photovoltaïque :**

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule). Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers.

Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques :

- les modules solaires monocristallin C'est la cellule qui a le meilleur rendement (12-16% ; jusqu'à 23% en laboratoire)
- les modules solaires polycristallin leur rendement est plus faible ; (11% - 14% jusqu'à 18% en laboratoire)
- les modules solaires amorphe : Cette catégorie a un faible rendement (8% - 10% ; 13% en laboratoire), [16]



**Figure.I.3** : champ photovoltaïque

### **I.5. Modes d'utilisation d'un système solaire photovoltaïque :**

Le choix du mode d'utilisation d'un système solaire se fait selon des exigences imposées que ce soit technique, économique ou géométrique. Pour cela il existe principalement trois modes à savoir :

- Autonome
- Hybride
- raccordée au réseau. [16]

#### **I.5.1 Système autonome :**

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme est montré sur la Figure (I.4) qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de La production , Ce système de stockage représente une part très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, des systèmes de gestion de l'énergie ont été développé afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement. [16]





Figure. I.4 : Structure d'un système PV autonome

### I. 5.2 Système hybride :

Les Systèmes Hybrides sont généralement des Systèmes PV AC où les panneaux solaires sont combinés avec d'autres sources d'énergie, comme par exemple une éolienne ou un groupe électrogène ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. ... Lorsque le groupe s'arrêtera, le système basculera automatiquement sur les batteries, Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée. [15]

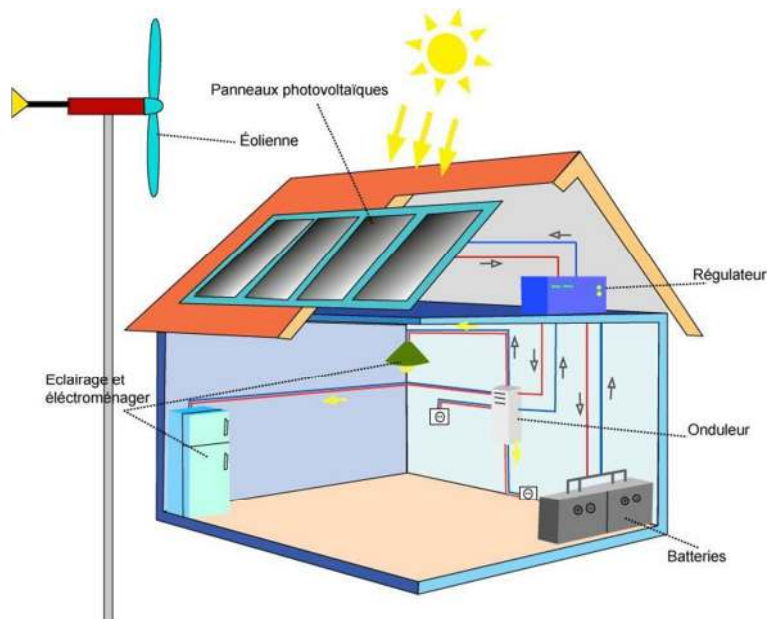


Figure.I.5 : Exemple de la structure d'un système PV hybride

### I. 5.3 Système PV raccordée au réseau :

Une installation PV peut être raccordée avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings.

Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs

Dans le 2ème chapitre on va bien détailler ce mode d'utilisation et expliquer le principe de fonctionnement de chaque composant dans le système. [16]



Figure. I.6 : Structure d'un système PV raccordée au réseau

### I.6. Avantages de l'énergie photovoltaïque [14]:

- Aucune émission, combustion ou des déchets radioactifs (ne contribue pas perceptible au changement climatique mondial ou de l'air / pollution de l'eau).
- Faibles coûts d'exploitation (pas de carburant).
- Pas de pièces mobiles (long durée d'utilisation).
- Pas de corrosion ou les questions de sécurité à haute température (fonctionnement à température ambiante)
- Haute fiabilité des modules solaires (les garanties des fabricants de plus de 30 ans).
- Production annuelle assez prévisible.
- Modulaires (petits ou grands incréments).
- Peut-être intégré dans des structures nouvelles ou existant de construction..

- Peut-être installé très rapidement à presque n'importe quel point d'utilisation
- Le secteur économique du photovoltaïque autonome n'est pas encore totalement exploité.

### 1.7. Inconvénients de l'énergie photovoltaïque [14]:

- Les coûts de fabrication élevés.
- Production horaire ou quotidienne imprévisible.

### 1.8. L'irradiation solaire

La carte d'irradiation solaire annuelle mondiale moyenne, montre que l'Algérie est située dans la zone optimale des gisements solaires i.e dans la zone sud, ou la moyenne annuelle est entre 2200 et 2500 KW/m<sup>2</sup> Figure 1.7 [3].

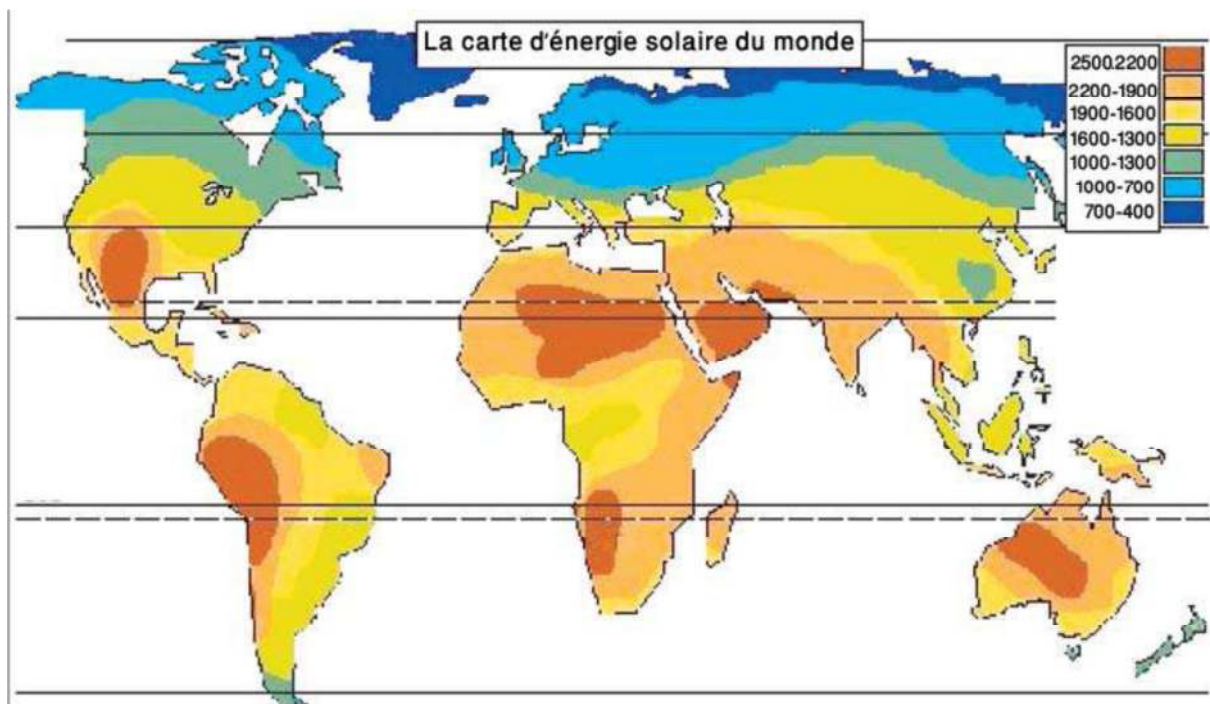


Figure 1.7. Irradiation solaire mondiale moyenne annuelle [KW/m<sup>2</sup>].

### Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons d'abord présenté un aperçu général de l'énergie PV et ses Concepts de bases. Ensuite nous avons parlé des différents modes de cette énergie pour qu'on puissions détailler celle qui est raccordé dans le réseau dans le deuxième chapitre.

# Chapitre 02

Conversion photovoltaïque

## I.1 Introduction :

Comme le système PV connecté au réseau représente une grande majorité du marché total, nous nous intéressons uniquement à ce type de système, c'est pour ça , dans ce chapitre on va expliquer le rôle de chaque composant de ce système, Dans un premier temps, nous étudierons la cellule photovoltaïque qui est l'élément de base de tout panneau solaire. Nous nous intéresserons ensuite aux associations de ces cellules permettant de construire des éléments plus ou moins grands : du panneau solaire au champ photovoltaïque.

Après avoir discuté des applications, nous verrons comment il est possible en fonction de l'application d'adapter l'énergie photovoltaïque à la charge associée à l'aide des onduleurs et hacheurs.

## I.2 Chaîne de conversion d'un système photovoltaïque

. La chaîne type de conversion d'énergie d'un tel système est montrée dans la Figure I-1. [2]

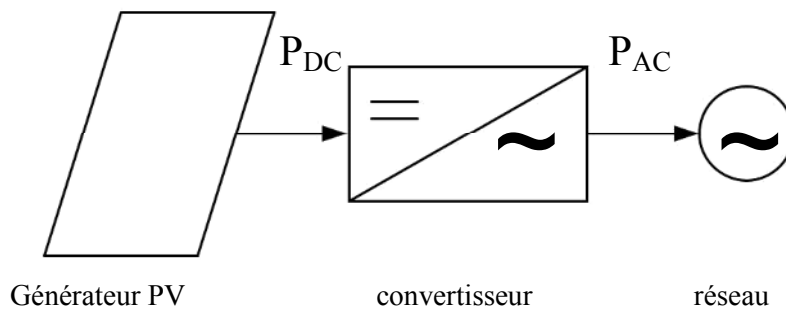


Figure II-1 : Chaîne de conversion d'énergie d'un système PV connecté au réseau

Cette chaîne est composée de trois parties principales :

- D'un générateur PV qui produit la puissance continue ( $P_{DC}$ ) issue des panneaux en fonction de son environnement (ensoleillement et température) ;
- D'un groupe convertisseur qui permet d'extraire la puissance maximale issue du générateur PV afin de la convertir en puissance alternative ( $P_{AC}$ ) ;

Cette puissance est ensuite injectée sur le réseau public de distribution de l'électricité grâce à un transformateur élévateur ce dernier représente la 3ème partie de la chaîne de conversion.

[1]

### I.2.1. Générateur photovoltaïque

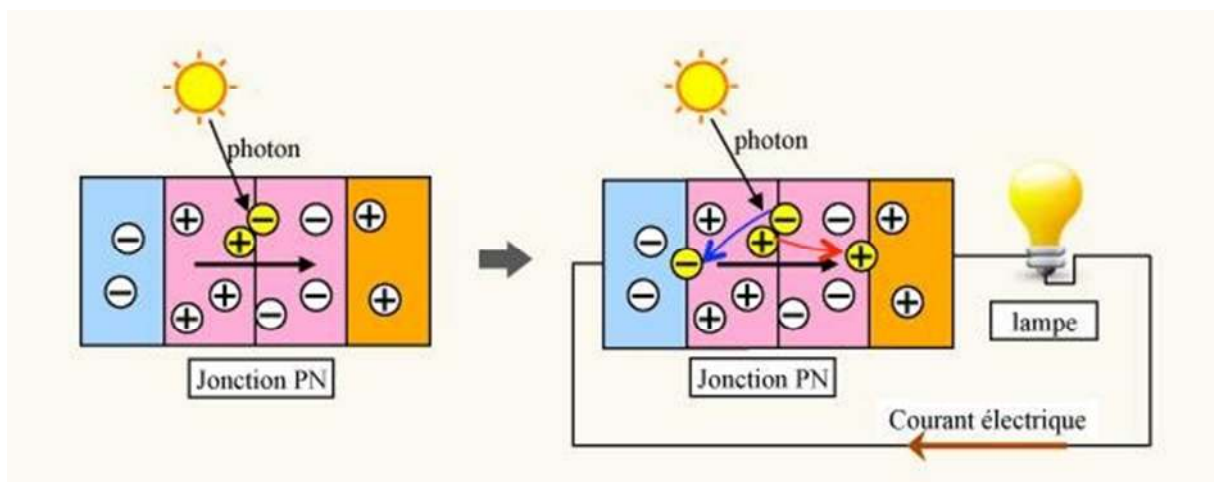
Le générateur photovoltaïque est l'unité de production d'énergie électrique sous forme de courant continu. Le composant élémentaire de cette unité qui convertit l'énergie solaire en l'énergie électrique est la cellule photovoltaïque. [2]

#### I.2.1.1. Cellule PV

Le principe de fonctionnement d'une cellule PV repose sur le principe de l'effet

photovoltaïque. Ce dernier permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de production et de transport de charges électriques positives et négatives dans un matériau semi-conducteur comme le silicium. Ce matériau est composé de deux couches, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit, dites respectivement dopée de type "n" et dopée de type "p". Lorsque la première couche est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. La mise en contact des deux couches à dopages opposés dans ce semi-conducteur en y ajoutant des contacts métalliques constitue un élément connu : la diode. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction, créant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, comme représentée sur la figure I-2, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule. Cette jonction a donc les caractéristiques électriques d'une diode au silicium classique avec, sous illumination, l'apparition d'un photo-courant indépendant de la tension et proportionnel au flux lumineux et à la surface de la cellule.[1]



**Figure II- 2: Schéma de l'effet photovoltaïque sous illumination**

#### **a- Cellules cristallin :**

Dans le marché, les cellules au silicium cristallin sont encore les plus répandues. Elles se Présentent sous formes de plaquettes carrées ou pseudo-carrées. Dans le cas des matériaux « cristallin », le silicium qui les constitue est un cristal, avec un arrangement ordonné avec des atomes, selon une structure atomique de type tétraédrique. Si la cellule est constituée d'un seul cristal, l'appellation est *silicium monocristallin* avec un aspect uniforme, gris bleuté ou noir. Le *silicium poly-cristallin* est fabriqué à partir des résidus provenant de la fabrication du *silicium monocristallin*. Le procédé de cristallisation consiste en la refonte de ces résidus

suivie d'une resolidification unidirectionnelle sous forme de structure colonnaire *multi cristalline* à gros grains (aspect mosaïque compact de fragments métalliques bleutés), dont la taille est comprise entre 1mm et 10 cm. Cependant, pour ce matériau, les nouveaux procédés de recristallisation ne permettent pas toujours de les différencier, le grain étant trop fin ;Leurs différenciations se font donc à leurs formes qui sont généralement carré comme représentées dans la figure I-3. [1]



**Figure II- 3: Cellule au silicium monocristallin et cellule au silicium polycristallin**

#### **b-Cellule amorphe :**

Les modules solaires amorphes sont des panneaux solaires proposant un rendement largement inférieur aux modules solaires cristallins. Cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée, la couleur de la cellule amorphe est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres comme est montré dans la figure (II.04). [1]



**Figure II- 4 : cellule amorphe**

Pour améliorer sans cesse les performances, les constructeurs multiplient les procédés sophistiqués : diffusion des charges très proche de la surface avant pour améliorer la collecte des photons de petite longueur d'onde (photons bleus très énergétiques et pénétrant peu dans le silicium), métallisation avant extrêmement fine déposée au fond d'une gorge gravé au laser, deux couches antireflet... [LABOURET].

Les technologies cristallines (multi-cristallin et monocristallin ) sont de loin les plus utilisées

aujourd'hui (environ 87.9%) mais les technologies "couches minces", en particulier CIS et CdTe se développent de plus en plus sur le marché.

La technologie amorphe (a-Si) qui a été une des technologies préférées a connu une baisse dans le marché actuel par rapport à la technologie couche mince comme est montré dans la figure I-04 avec la répartition des technologies sur le marché.

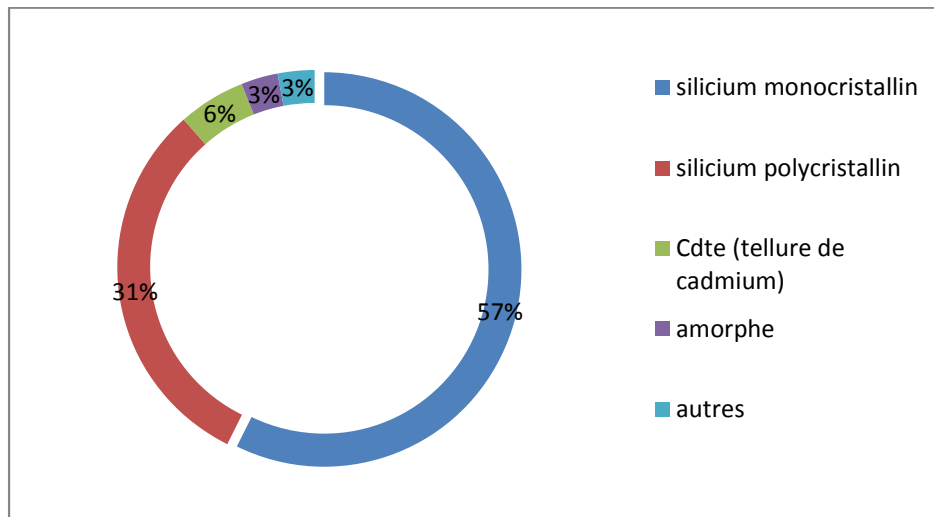


Figure II- 5: Répartition de la production de cellules par technologie . [1]

### c-Avantages et inconvénients de différentes catégories de cellules :

Le tableau suivant résume les principaux avantages et inconvénients de différentes catégories des cellules

Matériau de cellules	Avantages	Inconvénients	Principales utilisations
<b>Silicium monocristallin</b>	Très bon rendement le plus retrouvé dans le marché mondiale	-Cout élevé -sensible a la température élevé	-Aérospatiale -modules pour toits -façades
<b>Silicium polycristallin</b>	-Bon rendement de conversion, environ 100 w/m <sup>2</sup> . Lingot moins cher à produire. -Le moins sensible à la température élevée. -Adapté à la production à grande échelle.	Rendement faible sous un faible éclairciment	-Dans les zones chaudes pour toits -façades et générateurs



<b>Silicium amorphe</b>	Très faibles épaisseurs. Fonctionne avec un faible éclairement et sous ombrage Partiel. Moins sensible aux températures élevées	Rendement faible en plein soleil. Dégradation sous lumière	Appareils électroniques intégration dans le bâtiment
-------------------------	---	---	--

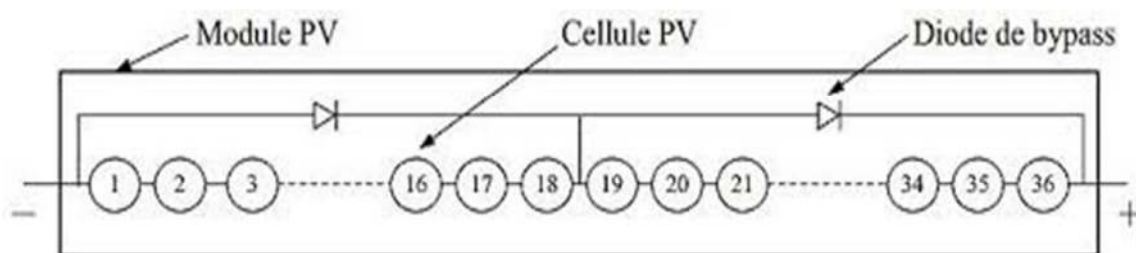
**Tableau 2. 1** Avantages et inconvénients des cellules solaires à base de silicium[9].[10]

### I.2.1.2. Module photovoltaïque

Le module photovoltaïque est un ensemble de cellules assemblées pour générer une puissance électrique exploitable, lors de son exposition à la lumière. Cet assemblage en série doit être protégé pour rendre le panneau apte à un usage en extérieur. Les cellules sont en effet des objets fragiles et sensibles à la corrosion, qu'il convient de protéger mécaniquement et de mettre à l'abri des rigueurs du climat (humidité, variations de température, etc.).

Des panneaux de diverses puissances sont réalisés selon la surface mise en œuvre (typiquement de 1 à 300 Wc par panneau) et capables de générer du courant continu lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Ils constituent la partie productrice d'énergie dans un générateur photovoltaïque. Des panneaux plus puissants sont disponibles sur le marché, surtout depuis l'essor des installations connectées au réseau, les limites étant liées au poids, et à la manipulation de la structure, et aux contraintes de maintenance.

Un module « classique » contient 36 ou 72 cellules. Mais il existe des modules sur le marché de 40, 54, 60 cellules [TENESOL]. La figure I-05 montre la structure d'un module photovoltaïque face avant et face arrière contenant 36 cellules.[1]



**Figure II- 6:** Mise en série de cellules PV dans le module avec les deux diodes by-pass

La figure I-6 montre la structure d'un module photovoltaïque face avant et face arrière contenant 36 cellules.

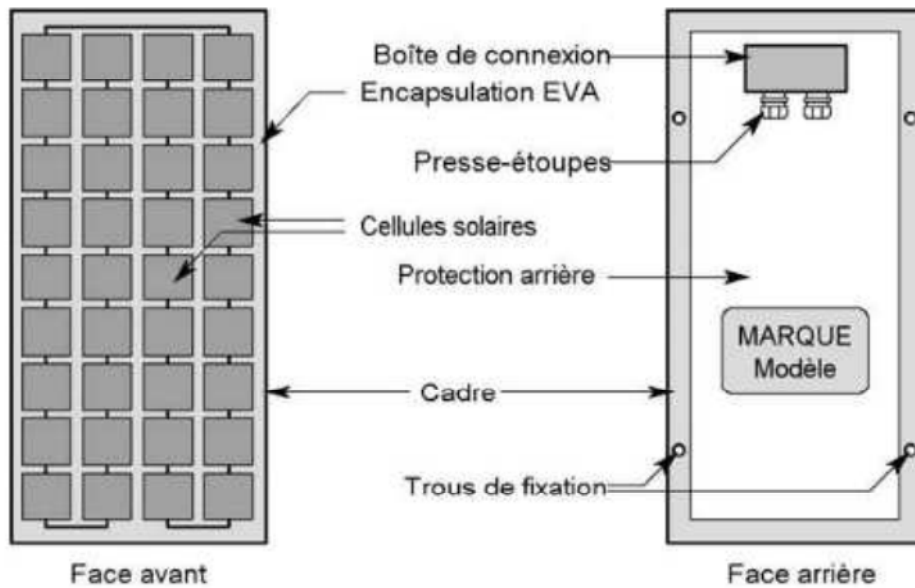


figure II-7 : Structure d'un panneau photovoltaïque face avant et face arrière

### I.2.1.3. Champ PV :

Dans le but d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire de regrouper les modules en série et en parallèle. Ce groupement forme un champ photovoltaïque. La figure I-6 montre l'architecture série parallèle d'un champ photovoltaïque.

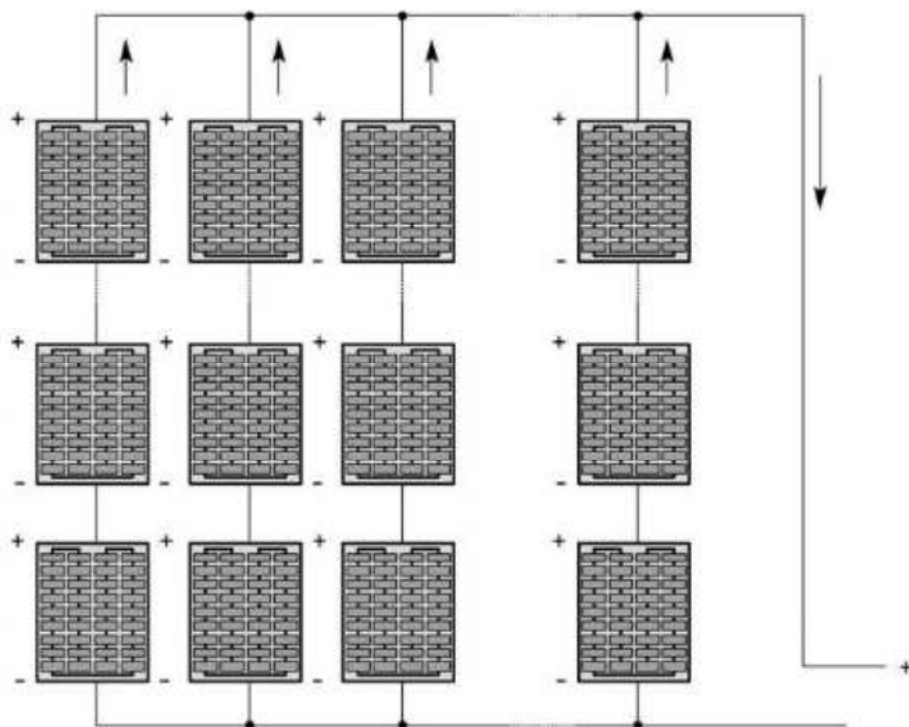


Figure II- 8: Exemple de structure de champ photovoltaïque

## I.2.2. Les convertisseurs

Le groupe convertisseur se compose de deux blocs en série :

- Un convertisseur DC/DC qui permet d'extraire la puissance maximale issue des panneaux photovoltaïques. Ce convertisseur est donc muni d'un algorithme de recherche de type MPPT (Maximum Power Point Tracker) ;
- Un convertisseur DC/AC qui permet de convertir la puissance maximum, extraite des panneaux, en puissance alternative et permet la synchronisation avec le réseau ;

La figure I-7 montre les étages de conversion d'un système photovoltaïque avec leurs différentes commandes.[1]

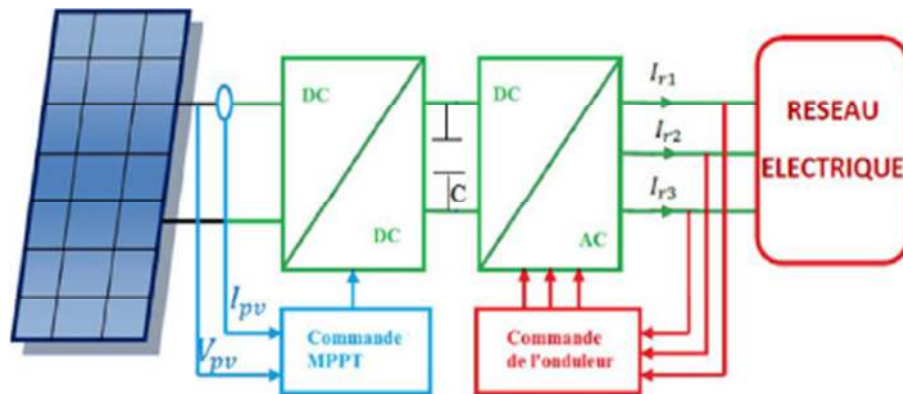


Figure II- 9: convertisseur installé dans un système PV (en vert )

## I.2.3. Câblage et boîte de jonction

Le câblage est dans le but de regrouper électriquement les modules solaires. Généralement, les modules sont câblés tout d'abord en série pour réaliser des branchements qui comportent chacune leur diode en série. La mise en parallèle de branchements est réalisée, pratiquement, à l'aide de boîtes de jonction fixées sur les châssis [5]. Cette boîte de jonction peut contenir des éléments de protection tels que des fusibles, des interrupteurs et des sectionneurs [2].

Il est indispensable d'apporter un soin particulier au serrage des cosses et au câblage d'une installation car une chute de tension trop importante dans les connexions et dans les câbles peut réduire considérablement le courant de charge de la batterie. Cette chute de tension est loin d'être négligeable lorsque de forts courants sont fournis sous de faibles tensions. Cette contrainte impose l'utilisation de câbles résistant aux intempéries et dont la section sera fonction de la distance entre panneau solaire et batterie.[5]



**Figure II.10:** Exemple de boîte de jonction et câblage

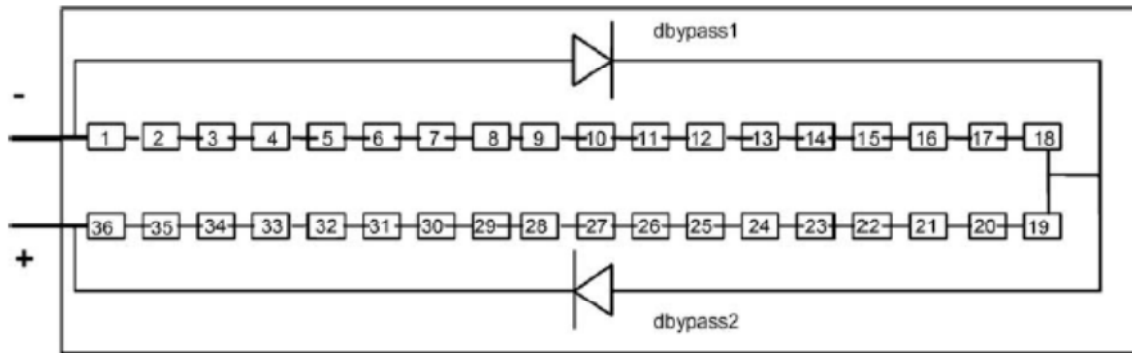
#### **1.2.4. Système de protection**

Des protections électriques sont ajoutées aux modules PV, dans le but d'augmenter sa durée de vie, en évitant les pannes liées à l'association des cellules. Pour cela, deux types de protections sont employées dans l'installation PV. Du fait que notre travail se concentre sur des défauts de générateur PV nous ne nous intéressons donc qu'aux composants servant à la protection du générateur PV.

##### **1.2.4.1. Diode de by-pass**

Les cellules dans un module sont associées en plusieurs groupes. Chaque groupe est ensuite connecté en antiparallèle avec une diode, appelée diode de by-pass ou diode de dérivation.

Cette diode sert à protéger les cellules contre leur fonctionnement en régime inverse. On compte généralement 18 cellules pour une diode de by-pass. Par contre, ce nombre peut varier selon les différents fabricants des modules. Par ailleurs, pour mieux protéger les cellules, la connexion de chaque cellule individuelle à une diode de by-pass, d'autres architectures de connexion des diodes de by-pass dans le module, comme on peut le voir dans la Figure 1.8, Mais ces propositions ne sont pas largement appliquées du fait de la difficulté de fabrication. [6]



**Figure II- 11: représentation des deux diodes by-pass dans un module PV**

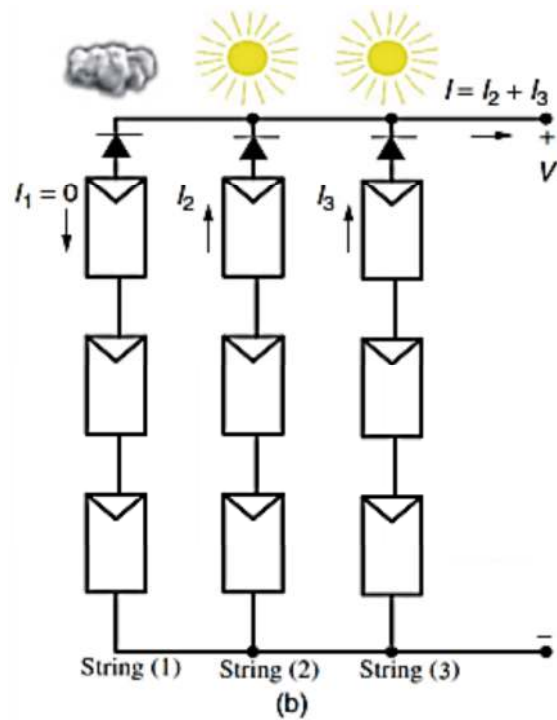
#### 1.2.4.2. Diode anti-retour

La tension produite par chaque string peut être différente. Lors de la mise en parallèle de ces strings pour former un champ, le string avec la tension la plus faible peut absorber un courant inverse provenant des autres strings. Cela conduit donc à une baisse de production et les modules du string traversés par le courant inverse pourraient être également susceptibles de la défaillance. Pour éviter ces courants inverses, une diode anti-retour est placée au bout de chaque string (voir Figure I-4).

L'utilisation de la diode anti-retour introduit pourtant une perte dans la production du fait de la chute de tension causée par cette diode pendant le fonctionnement normal du champ PV. De plus, ces diodes peuvent se mettre en défaut et demandent par conséquent un contrôle régulier.

Un fusible est parfois utilisé à la place de la diode anti-retour. Par contre, l'utilisation du fusible ne permet pas de protéger le string contre le courant inverse. Le fusible doit être dimensionné afin que les composants du string (module, câble, connecteur) puissent supporter l'intensité du courant inverse lorsque ce dernier existe.

Le choix de l'un des deux composants réside donc sur la tolérance entre la perte en fonctionnement normal (pour le cas d'utilisation de la diode anti-retour) et la perte causée par le courant inverse (lors de l'utilisation du fusible). [5]



**Figure II. 12:** Protection avec une diode anti-retour

**Conclusion :**

Dans le but de faire la détection des défauts au niveau des installations photovoltaïques pour pouvoir les faire réparer , Ce chapitre a été principalement consacré à la description du générateur photovoltaïque et les composants utilisés pour sa protection et de parler aussi sur les modules plus utilisés.

# Chapitre III

Modélisation

### III.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons le modèle mathématique décrivant le comportement d'un générateur PV en fonctionnement sain , ainsi des connaissances théoriques nécessaires pour décrire le comportement des générateurs photovoltaïques et l'effet de variation de paramètre interne et externe de ce générateur

### III.2. Modélisation de la cellule solaire :

Nous proposons l'étude de trois configurations (schéma équivalent) de cellule photovoltaïque.

- Modèle à une seule diode .
- Modèle à deux diodes .
- Modèle à trois diodes .

Mais on va prendre le premier modèle a une seule diode pour étudier le comportement générateur

#### III.2.1 Modèle à une seule diode :

La figure (III.1) présente le schéma équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque :

Le courant délivré par la cellule est exprimé comme suit :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (3.1)$$

Tel que :

$I_{ph}$  : le courant photonique généré dans les conditions standard(STC) (A).

Ce courant définit par :

$$I_{ph} = (I_{pn} + k_i \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (3.2)$$

$$\Delta T = (T - T_n) \quad (3.3)$$

Tel que  $T$  : température de référence 298(<sup>0</sup>k),

$T_n$  : température de la cellule(<sup>0</sup>k).

$G$  et  $G_n$  : ensoleillement et l'ensoleillement de référence (1000 W/m<sup>2</sup>).

$K_i$  : coefficient de température court –circuit



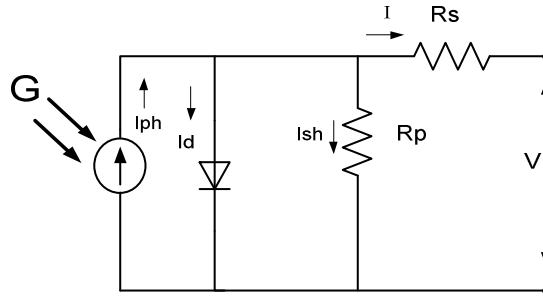


Figure. III.1. Modèle d'une cellule photovoltaïque

$T$  : température de référence 298(°k).

$Tn$  : température de la cellule(°k).

Le courant de la diode est défini par :

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(q \left( \frac{V+R_s I}{V_t} \right) - 1 \right) \right] \quad (3.4)$$

Bien que :  $I_0$ =courant de saturation de la diode qui égale :

$$I_0 = (I_{sc} + K_i \Delta T) / \exp\left(\frac{V_{co} + k_i \Delta T}{AV_t}\right) - 1 \quad (3.5)$$

Où:

$K = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K.( constante de Boltzmann).

$q = 1.6 \times 10^{-19}$  °C.

$V_{co}$ =tension du circuit ouvert (v).

$I_{sc}$  : courant de court-circuit(A) .

$R_s$  :la résistance série ( $\Omega$ ).

$V$  :la tension au borne de la cellule (v).

Le courant de la résistance shunt égale:

$$I_p = \frac{(V+R_s I)}{R_p} \quad (3.6)$$

Pour une cellule comme montre la figure (Fig 2) la caractéristique  $I=f(V)$  qui a une nature non linéaire.

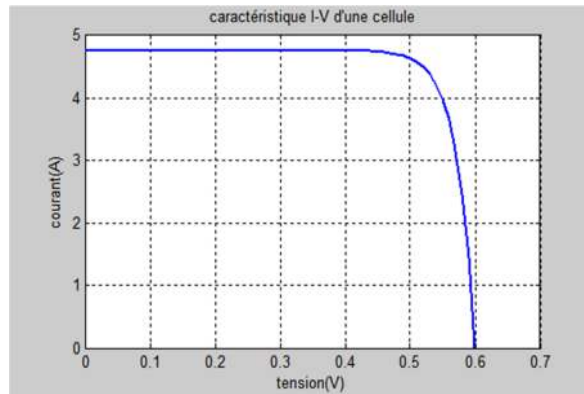


Figure.III.2 Caractéristique électrique d'une cellule solaire

La figure 3 représente la caractéristique I-V d'un module traduisant l'influence de différents ensoleillements à température fixe, le courant du module est proportionnel à l'ensoleillement, tandis que la tension de circuit-ouvert change légèrement avec l'ensoleillement, l'optimum de puissance est aussi proportionnel à l'ensoleillement. La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi conducteur sont très sensibles à la température.

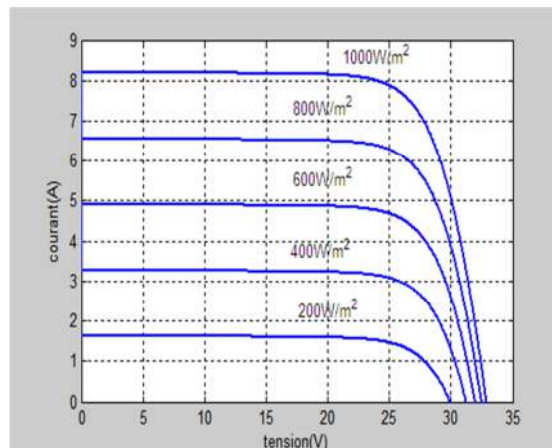


Figure.III.3.a. influence de l'ensoleillement caractéristique P-V du module.

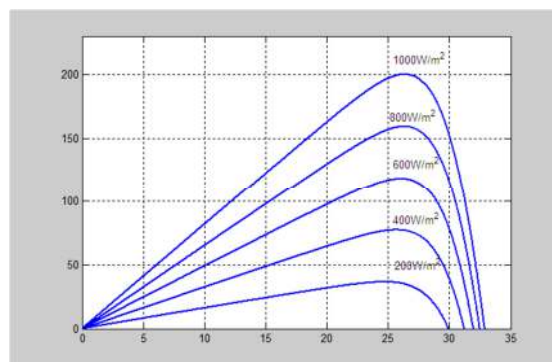


Figure.III.3.b. influence de l'ensoleillement sur caractéristique P-V du module

La figure (4) représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de la température, à un éclairement et constante.

On remarque que L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

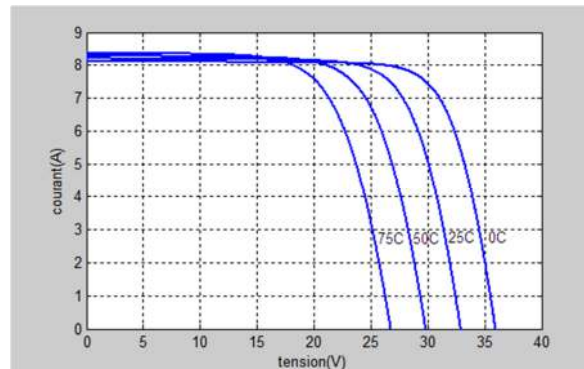


Figure 4.a. influence de température caractéristique I-V du module.

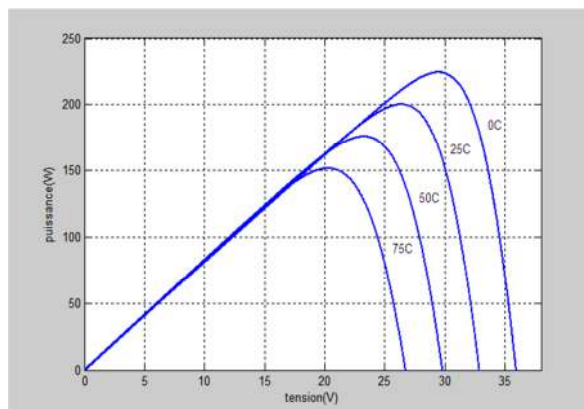


Figure 4.b. influence de température sur caractéristique P-V du module.

La résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles .

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone de la photodiode se comporte comme un générateur de tension et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court circuit.

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes opposées positives d'une photopile.

En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant .

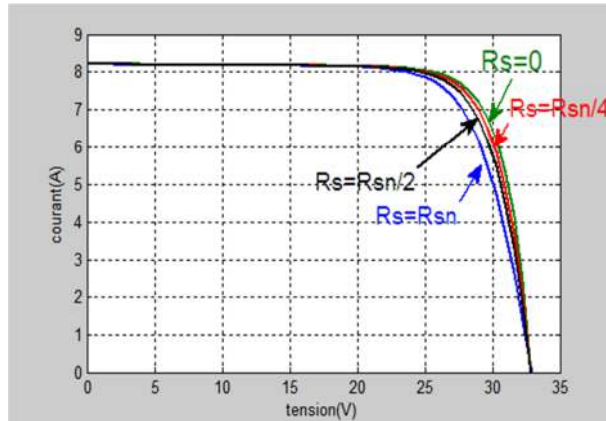


Figure.III.5 : Influence de la résistance série sur caractéristique P-V du module.

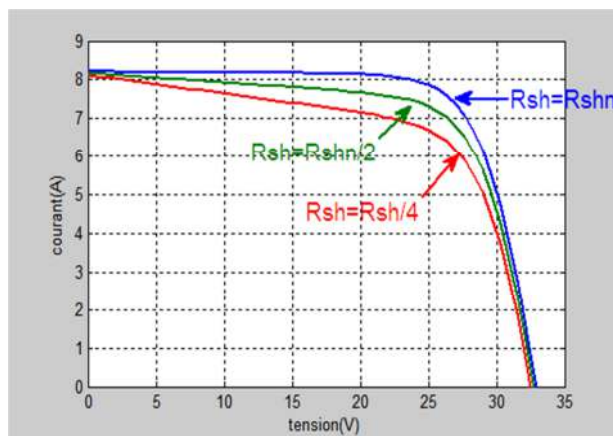


Figure.III.6 : influence de la résistance shunt sur caractéristique I-V du module.

Un panneau photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules qui sont constitués par l'association de cellules en série. La mise en série et en parallèle des panneaux permet d'obtenir la tension et le courant exigés dont les performances dépendent de l'association des cellules et de la matière qui les compose .

L'association en parallèle des modules délivre une courant égale à la somme des courants individuelles et une tension égale à celui d'une seule module.

La caractéristique d'un groupement de  $N_p$  modules solaires en parallèle est représentée par la figure(7).

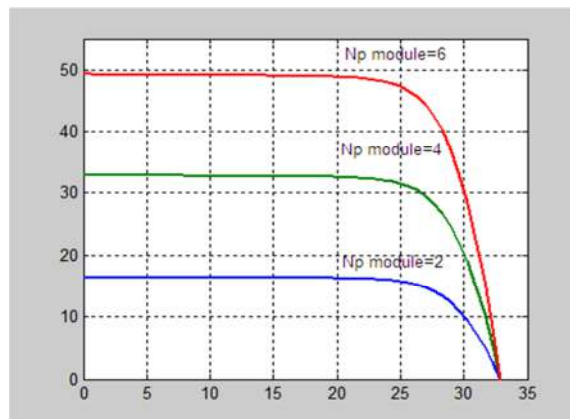


Figure.III.7.a : influence de la nombre de module parallèle sur la caractéristique I-V.

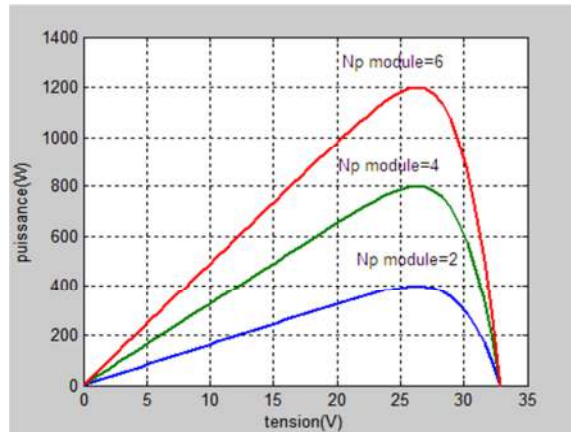


Figure III.7.b : influence de la nombre de module parallèle caractéristique P -V

L'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'un seul module. La caractéristique d'un groupement de  $n_s$  modules solaires en série est représentée par la figure(8).

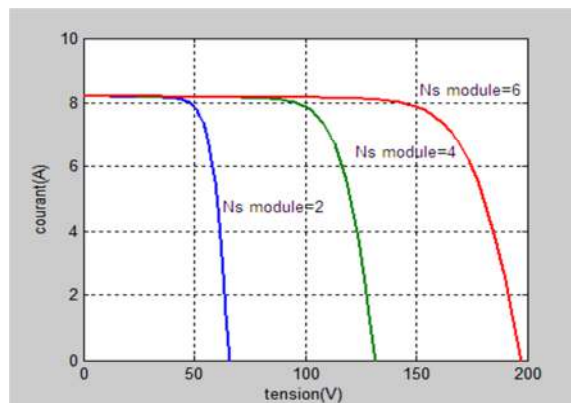


Figure.III.8.a : influence de la nombre de module série sur caractéristique I-V.

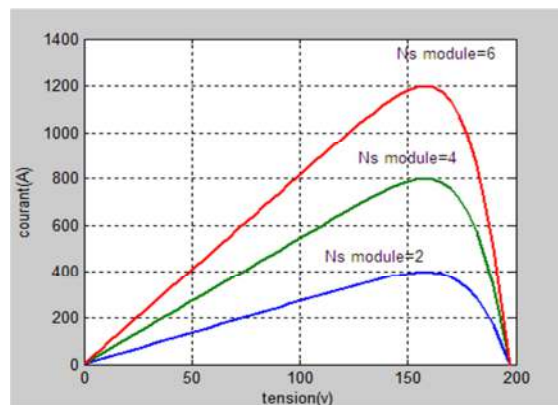


Figure.III.8.b : influence de la nombre de module série sur caractéristique P-V.

### III.3.Conclusion :

Il est nécessaire pour faire la simulation des défauts au niveau des générateurs photovoltaïque présenté dans le quatrième chapitre, on a présenté le modèle mathématique décrivant le comportement d'un générateur PV en fonctionnement sain avec ses caractéristiques sous l'effet des conditions interne et externe

# Chapitre 4

Défauts et méthodes de diagnostic

### III.1.Introduction :

Nous avons décrit dans le chapitre précédent les différents principaux constituant une unité de production d'un système PV. Nous décrivons dans cette partie les différents défauts et anomalies associés à ces composants.

Au cours de son fonctionnement, une installation PV peut être éventuellement soumise à différents défauts et conditions de fonctionnement anormales, nous montrons aussi les méthodes de diagnostic existantes pour localiser ou bien détecter ses défauts .

Pour mieux comprendre nous avons défini quelques notions dans les phrases suivantes :

**Défaut** : On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique.

**Symptôme** : c'est le changement de la quantité observée du comportement normal.

**Détection** : Elle consiste à reconnaître qu'un dispositif est dans un mode de Disfonctionnement à partir de la connaissance de certaines caractéristiques.

**Localisation** : Elle consiste à déterminer les causes physiques ou fonctionnelles d'une panne, c'est-à-dire à déterminer le ou les éléments à l'origine du défaut.

### III.2. Défauts de fonctionnement d'un générateur PV :

Aujourd'hui, la plupart des modules PV industrialisés sont garantis pour 25 ans, mais il n'existe pas de protocoles de test pour valider cette durée de vie Il est dit dans l'étude menée par [WOHLGEMUTH et *al.*], que le taux de dégradation annuel moyen est de 0.8 % comme le montre la figure I-1. Il est alors important d'évaluer les différents défauts éventuels liés aux cellules PV, aux modules PV, mais aussi aux champs PV. [1]

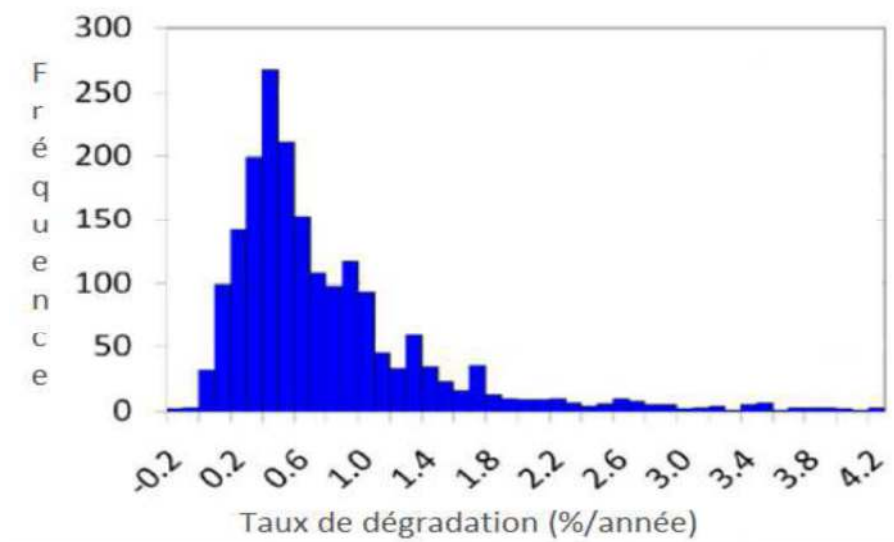


Figure III.1.Taux de dégradation d'un module PV par an

Le tableau 1.1. présente les principaux défauts et anomalies classés suivant l'emplacement de leur apparition au niveau d'un générateur PV .



<b>Composant</b>	<b>Défauts et anomalie</b>
<b>Générateur PV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feuilles d'arbre, déjections, pollution, sable, neige etc.</li> <li>• Détérioration des cellules, fissure, échauffement des cellules</li> <li>• Pénétration de l'humidité, dégradation des interconnexions,</li> <li>• Corrosion des liaisons entre les cellules</li> <li>• Modules de performances différentes</li> <li>• Module arraché ou cassé</li> <li>• Modules court-circuités, modules inversés</li> </ul>
<b>Boite de jonction</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rupture du circuit électrique</li> <li>• Court-circuit du circuit électrique</li> <li>• Destruction de la liaison</li> <li>• Corrosion des connexions</li> </ul>
<b>Câblage et Connecteur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Circuit ouvert</li> <li>• Court-circuit</li> <li>• Mauvais câblage (module inversé)</li> <li>• Corrosion des contacts</li> <li>• Rupture du circuit électrique</li> </ul>
<b>Protection (diode bypass et diode antiretour)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destruction des diodes</li> <li>• Absence ou non fonctionnement de diodes</li> <li>• Inversion de la polarité des diodes au montage</li> </ul>

**Tableau 4. 1: Différents défauts du GPV [4].**

### **III.2.1. Classification des défauts de générateur PV :**

Il existe plusieurs classifications des défauts qui sont citées dans la littérature. Dans notre travail, nous avons opté pour la classification par niveau d'apparition de défaut et l'étape à laquelle ils interviennent et s'ils peuvent modifier le comportement du composant de cette étape (cellule, groupe de cellules, modules, strings, champ). Le tableau 1.2 présente cette classification.

La première colonne montre la succession des composants. La deuxième donne la nature des différents défauts intervenant dans les étapes et la dernière colonne donne la dénomination de chaque catégorie de défauts pour la modélisation. et la dernière colonne donne la dénomination de chaque catégorie.

<b>Composant du champ</b>	<b>Nature des défauts</b>	<b>Dénomination des défauts</b>
<b>Cellule</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Module arraché ou cassé</li> <li>• Pylônes, cheminée, sable, neige etc.</li> <li>• Echauffement des cellules</li> <li>• Dégradation des interconnexions</li> <li>• Fissure</li> <li>• Corrosion des liaisons entre</li> </ul>	Défaut de mismatch et d'ombrage

	cellules, Modules de performances différentes, Détérioration des cellules, Pénétration de l'humidité	
<b>Groupes de cellules</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Destruction des diodes</li> <li>• Absence de diodes,</li> <li>• Inversion de la polarité des diodes</li> <li>• Diode mal connectée</li> <li>• Diode court-circuitée</li> </ul>	Défaut de diode by-pass
<b>Module</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modules court-circuités,</li> <li>• Modules shuntés</li> </ul>	Défaut de module
<b>String</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rupture du circuit électrique</li> <li>• Destruction de la liaison</li> <li>• Corrosion des connexions</li> <li>• Corrosion des contacts</li> </ul>	Défaut de connexion

**Tableau 4. 2: Classification des défauts et les anomalies d'un GPV [4].**

### **III.3. Défaut des systèmes PV sur le réseau de distribution :**

Le raccordement des systèmes PV sur le réseau de distribution peut avoir des conséquences sur son comportement. Inversement, le réseau de distribution peut aussi influencer le comportement normal des systèmes PV qui peuvent provenir des caractéristiques intrinsèques de distribution. Par exemple, les creux de tensions peuvent être l'une des principales causes de déclenchement des systèmes PV et donc peuvent perturber le fonctionnement des onduleurs.

De plus, le fonctionnement des onduleurs sans transformateur peut être affecté en présence d'harmoniques.

Dans l'étude menée par un nouveau contrôle des systèmes PV a été présenté afin de réduire ces harmoniques. Dans cet article trois méthodes de contrôle ont été développées :

- Le contrôle de la puissance ;
- Le contrôle pour la réduction des courants harmoniques ;
- La stabilisation de la tension du réseau en contrôlant la puissance réactive optimale ;

Les causes de ces courants harmoniques dans le système sont liées aux distorsions des tensions du réseau. Pour cela deux méthodes de contrôle, afin de réduire ces courants, ont été créées et testées sur une installation de 400kW :

- Le contrôle courant en boucle fermée ;
- Le contrôle pour compenser les perturbations ;

L'avantage de la nouvelle méthode est la faible interférence avec le contrôle de courant. Le nouveau contrôle de compensation de perturbations permettra ainsi d'éliminer les faibles courants harmoniques du système. [1]

### III.4. Méthodes de diagnostic :

Plusieurs méthodes de diagnostic sont rapportées dans la littérature [6] à savoir :

- Méthode d'infrarouge
- Méthode électrique
- Méthode de réflectométrie
- Méthode d'analyse de point de fonctionnement . [4]

#### III.4.1. Méthode d'infrarouge

La méthode de thermographie ou d'imagerie d'infrarouge permet de localiser et identifier le défaut à la cellule près à l'aide d'une caméra thermique. Cette dernière peut également localiser des éventuels problèmes au niveau de la connectique des systèmes tant côté courant continu que courant alternatif.

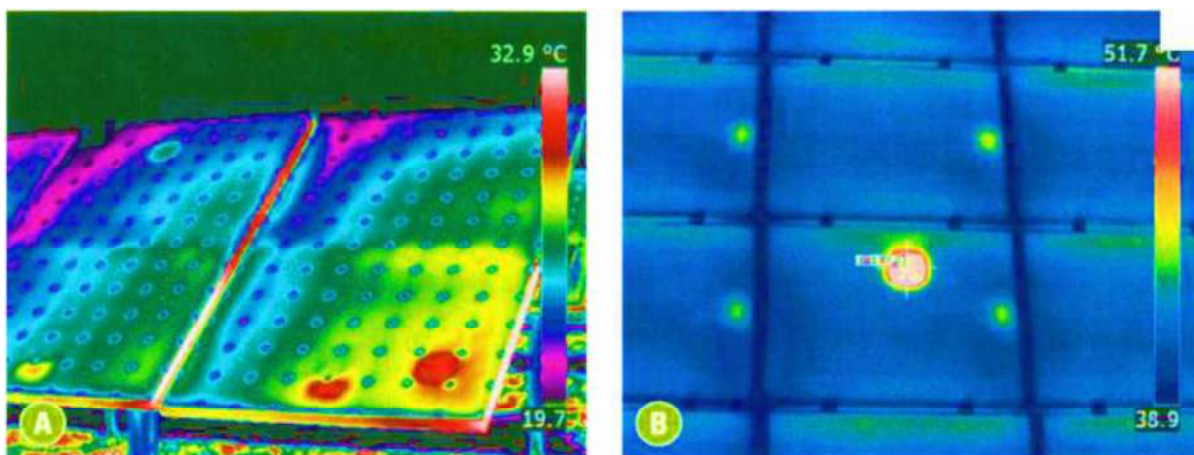
Il est possible d'identifier différents types de défauts comme :

- Des cellules endommagées lors d'un échauffement ;
- Des connectiques défectueuses au niveau de la boîte de jonction ;
- Des apparitions de point chaud ;
- Des diodes by-pass défectueuses ;
- Des craquements de cellules ;

Dès lors, l'examen des panneaux installés ou des connectiques est possible au cours de leur fonctionnement normal et ne nécessite pas l'arrêt du système.

Des inspections périodiques avec une caméra thermique ont permis d'identifier différents défauts au niveau du bus continu .

Pour obtenir des images thermiques correctes et pertinentes, il faut que certaines conditions soient réunies comme l'utilisation d'une caméra thermique appropriée, dotée d'accessoires nécessaires. L'utilisation de cette méthode et de cette caméra doit se faire lorsque la puissance de l'installation est à sa puissance optimale pour voir les effets de la température. L'angle d'observation doit être dans un intervalle favorable (entres 5° et 60°). [4]



**Figure III.2: Exemple de détection de défauts par thermographie infrarouge  
( thermogramme)**

#### III.4.1.1.Principe de fonctionnement :

La caméra infrarouge capte au travers d'un milieu transmetteur les rayonnements émis par une scène thermique. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques ou analogiques : ceux-ci sont transcrits en température par le calculateur et transformés en points lumineux sur un écran. L'image ainsi obtenue s'appelle « thermogramme ». [12]



Figure.III.3 Principe de fonctionnement de la caméra infrarouge.

#### III.4.1.2.Avantages de la thermographie infrarouge :

- **Mesure sans contact:** à distance – l'opérateur n'est pas exposé au danger.
- **Gain de temps:** ne nécessite pas d'arrêt de production, n'affecte pas l'activité de l'objet contrôlé.
- **Multidimensionnel:** comparaison possible entre 2 ou plusieurs milliers de points sur la même image.
- **Aide à la compréhension:** grâce à l'image vous savez à quel endroit porter votre attention.
- **Mesure en temps réel:** thermogramme généré à la vitesse de la lumière.
- **Prédiction des défauts:** les échauffements signes de défaillances annoncées sont visibles au plus tôt.

#### III.4.1.3. inconvénients :

- Nécessite du matériel spécifique et onéreux
- Risques d'erreur
- Nécessite un opérateur compétant et formé. [12]

#### III.4.2. Méthode électrique

Les systèmes de monitoring actuels d'un système PV sont essentiellement intégrés aux onduleurs. Dans ce cadre, les grandeurs mesurées les plus courantes sont :

- Le courant débité par le champ PV
- La tension aux bornes du champ PV
- La résistance d'isolement entre les bornes positive et négative du champ PV

Il est aussi possible d'ajouter les grandeurs complémentaires qui sont la température ambiante du site et l'ensoleillement aux mesures électriques. Ces données nécessitent un capteur spécifique (sonde de température et cellule de référence). Il convient, dans le cas où ces grandeurs sont nécessaires, de les traiter à l'aide d'un automate spécifique. Cet automate est relié à l'onduleur et centralise la totalité des données afin de les enregistrer et/ou de les envoyer sur un serveur distant [9].

### III.4.3. Méthode de réflectométrie :

La méthode de réflectométrie électrique est une méthode électrique qui permet de mesurer les caractéristiques électriques d'une ligne de transmission et de détecter tout point de discontinuité. La réflectométrie est couramment utilisée pour la détermination de l'état électrique de câbles et de lignes. Elle fournit des informations pour la détection, la localisation et la caractérisation de défauts. [4]

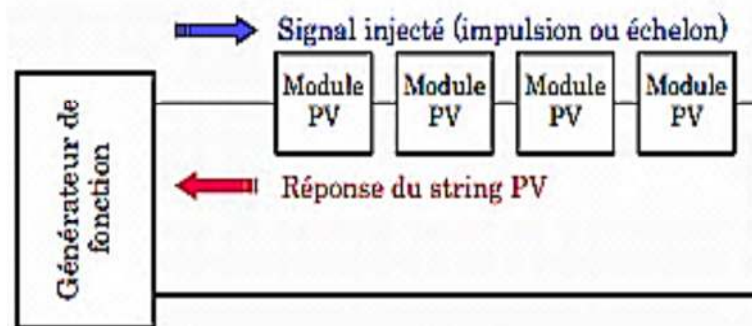


Figure III.4. Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV

#### III.4.3.1. Principe de fonctionnement de la réflectométrie :

La réflectométrie est divisée principalement en deux familles :

- la **réflectométrie temporelle (TDR Time Domain Reflectometry)** ;
- la **réflectométrie fréquentielle (FDR Frequency Domain Reflectometry)**.

Les deux sont basées sur la méthode décrite ci-dessus :

Un signal de type d'échelon ou d'impulsion est injecté dans le string PV qui consiste en une série de modules connectés par des câbles. Lorsque le signal de sonde se propage dans le réseau et rencontre une discontinuité électrique (défaut, dérivation, changement d'impédance, etc.), une partie de son énergie est renvoyée vers le port d'injection. Dans le domaine temporel (TDR), l'analyse des signaux réfléchis donne des informations sur la topologie du réseau ; dans le domaine fréquentiel (FDR), c'est l'analyse de l'onde stationnaire qui fournit ces informations.

Le signal renvoyé dépend du type de discontinuité/défaut rencontré :

- un court-circuit renvoie 100 % de l'énergie en inversant la polarité du signal ;
- le début de dégradation du conducteur métallique.
- circuit ouvert [11]

#### III.4.4. Méthode d'analyse du point de fonctionnement

La comparaison de la puissance maximale mesurée à celle simulée peut apporter plus d'informations sur le comportement du générateur PV. L'idée principale consiste à identifier le type de défaut présent sur une installation PV et plus particulièrement sur le générateur PV [11]. Ces défauts sont regroupés en 4 familles :

- Modules défaillant dans un string
- Fausse alarme
- String défectueux
- Ombrage, vieillissement, erreur MPPT .[4]

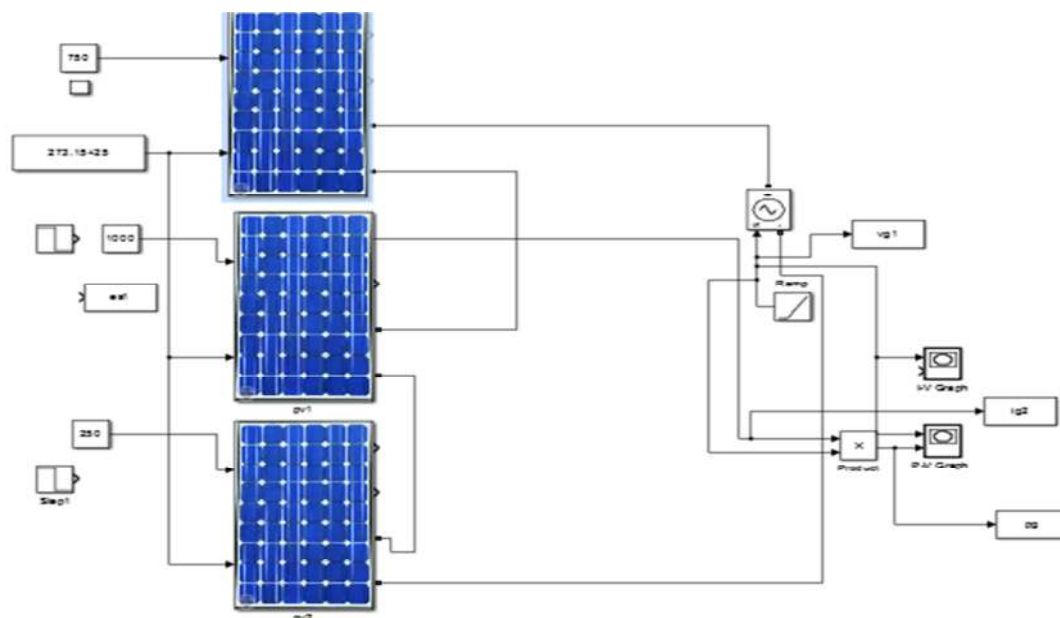
#### III.5. Modélisation

Selon le Tableau III-6, le défaut d'ombrage peut être modélisé par la variation des différents paramètres de la cellule. Du fait de la disparité des paramètres des cellules dans un champ.

Lors de la mise en série des composants, la tension produite par chaque composant n'est plus égale pour un même courant. Et lors de la mise en parallèle des composants, le courant fourni par chaque composant n'est plus identique pour une même tension.

##### III.5.1. Influence d'ombrage partiel

Soit un générateur PV contient 3 modules de type KC200GT voire figure III-13 tel que : l'irradiation  $G_1=750\text{W/m}^2$ ,  $G_2=1000\text{W/m}^2$ ,  $G_3=250\text{W/m}^2$ , figure



Figuer III-5 : bloc de simulation MATLAB / SIMULINK

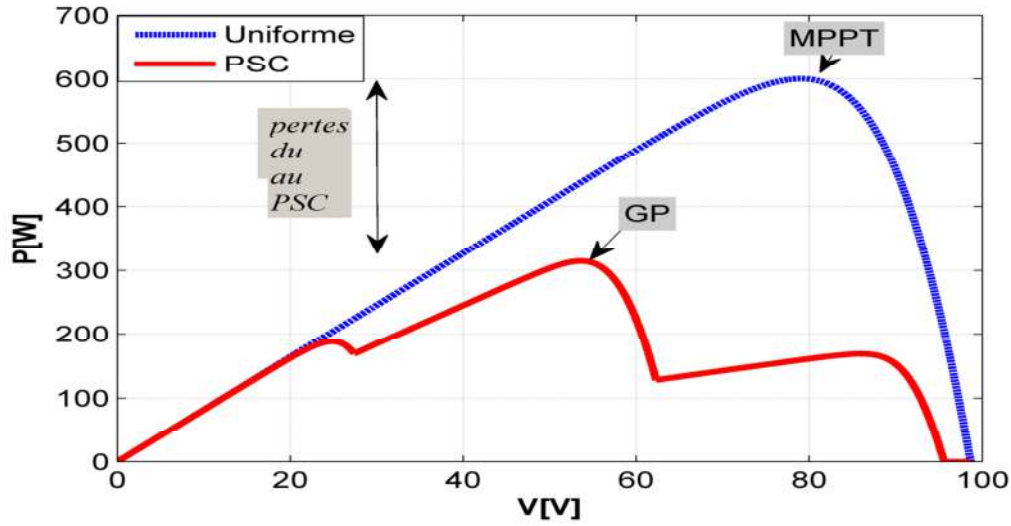


Figure III-6 : Comparaison entre les caractéristiques P-V dans le cas uniforme et la déséquilibre

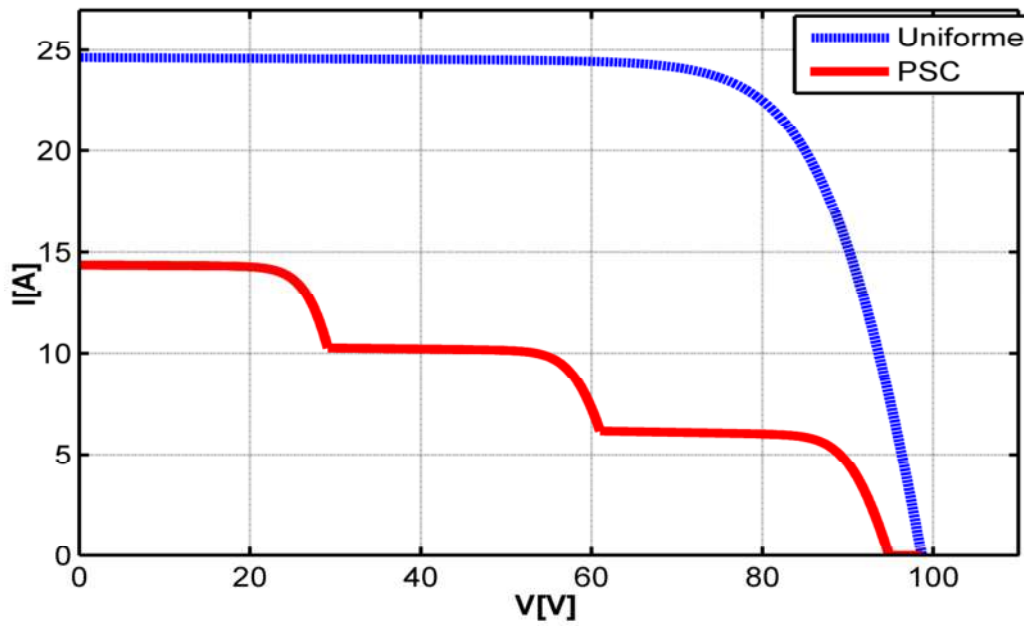


Figure III-7 : Comparaison entre les caractéristiques I -V dans le cas uniforme et de l'équilibre

### III.5.2. Défaut de diodes de bypass

Dans son bon état, la diode de bypass est passante quand la somme de la tension des cellules qu'elle protège est négative et elle est bloquée dans le cas contraire. Dans son état défaillant, ce rôle de protection n'est plus assuré. Selon le Tableau III-5, les défauts électriques



associés à cette diode sont : diode court-circuitée, diode déconnectée et diode inversée. En plus de ces défauts électriques, cette diode pourrait être éventuellement claquée en cours de fonctionnement et se comporter comme une impédance d'une valeur quelconque. La Figure II-16 montre un schéma d'un groupe de cellules dans lequel la diode de bypass est remplacée par un élément qui peut, à chaque fois, prendre un des états défectueux de la diode : court-circuit, circuit ouvert, impédance quelconque et diode inversée.

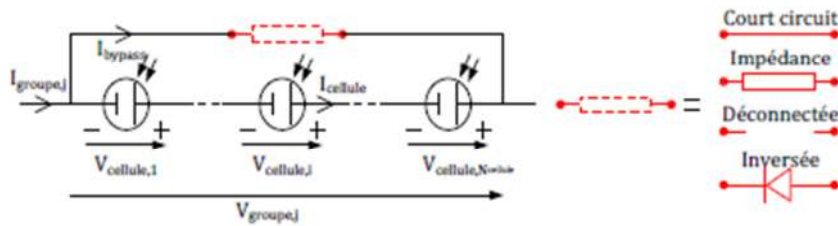


Figure III-8 : Schéma bloc d'un groupe de cellules PV avec la diode de bypass défectueuse

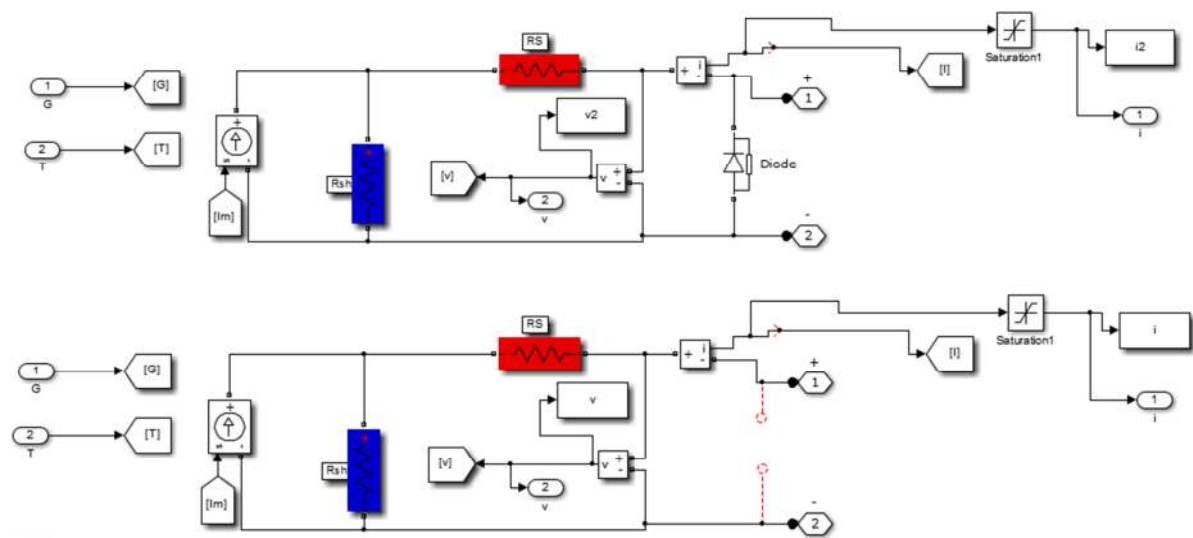


Figure III-9 : Bloc de simulation pour la protection d'une diode de bypass



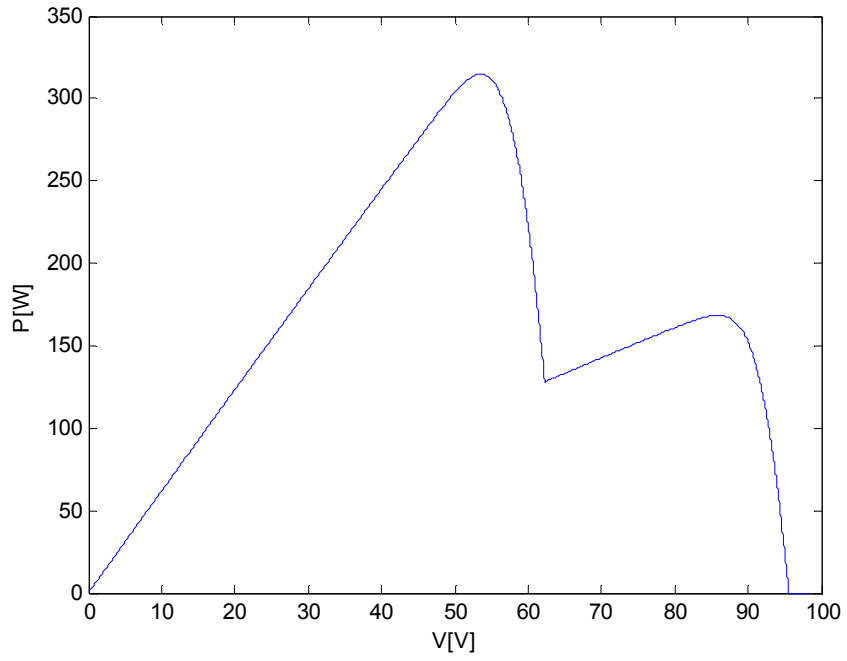


Figure III-10 : resultat simulation et elimination un diod by-pass

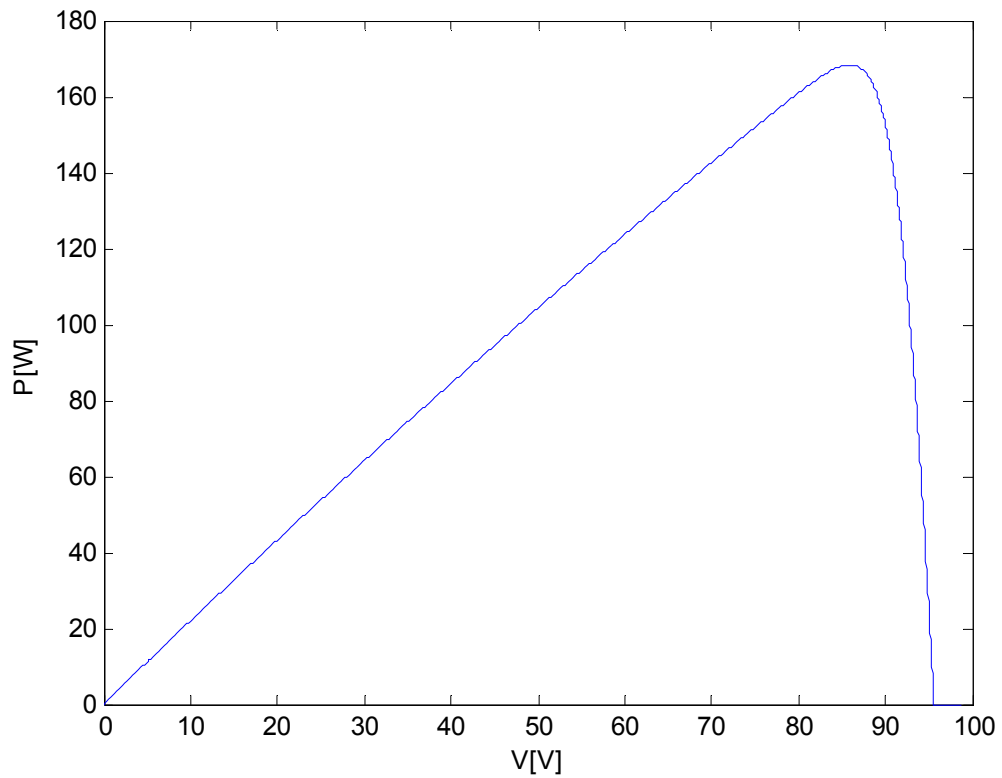


Figure III-11 : resultat simulation et elimination 2 diod by-pass

### III.5.3. Défaut de module

Le défaut de module se réfère à tous les défauts électriques associés à la connexion d'un module dans un string PV. Selon le Tableau 4.2, ces défauts électriques sont : module court-circuité, module connecté en parallèle avec une impédance et inversion de la polarité du module. La Figure III-21 montre le schéma d'un module avec l'élément qui représente, à chaque fois, un des états défailants de la connexion du module.

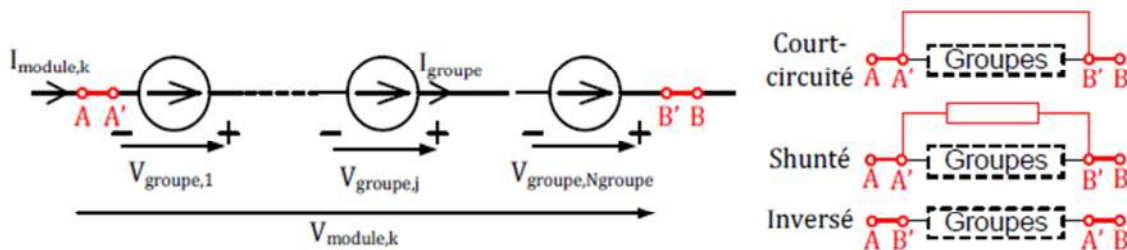


Figure III-12 : Schéma bloc d'un module PV défaillant

Dans le cas où le module est connecté en parallèle avec une impédance, la perte en courant du string augmente en fonction de la baisse en impédance. Quand un module est court-circuité, le string perd la tension d'un module. Si un module est inversé, le string perd deux fois la tension produite par un module car la tension produite par le module inversé sera soustraite de la tension produite par les autres modules.

### III.5.4. Défaut de connectique

Le défaut de connectique est lié au problème de l'augmentation de la résistance de connectique entre deux modules PV. En fonctionnement normal, cette résistance de connectique est quasi nulle. La valeur de cette résistance peut être augmentée dans plusieurs cas anormaux (corrosion de la connectique, vis mal serrée etc). Dans le cas extrême, une résistance infinie peut être utilisée pour représenter un module qui est déconnecté du string PV.

### III.5.4. Défaut de diode anti-retour

De la même manière que pour la diode de bypass, 4 types de défauts peuvent être envisagés pour la diode anti-retour : court-circuit, impédance quelconque, circuit ouvert et inversée.

La toute première étape de cette méthode d'inférence consiste à établir une base de connaissance sur la relation entre les défauts définis et les symptômes apparus. L'étape suivante est de générer analytiquement les symptômes potentiels identifiés à partir de la base de connaissance établie. La dernière étape consiste à établir le tableau d'inférence (ou tableau de signatures de défauts) afin d'analyser ensuite la capacité de diagnostic.

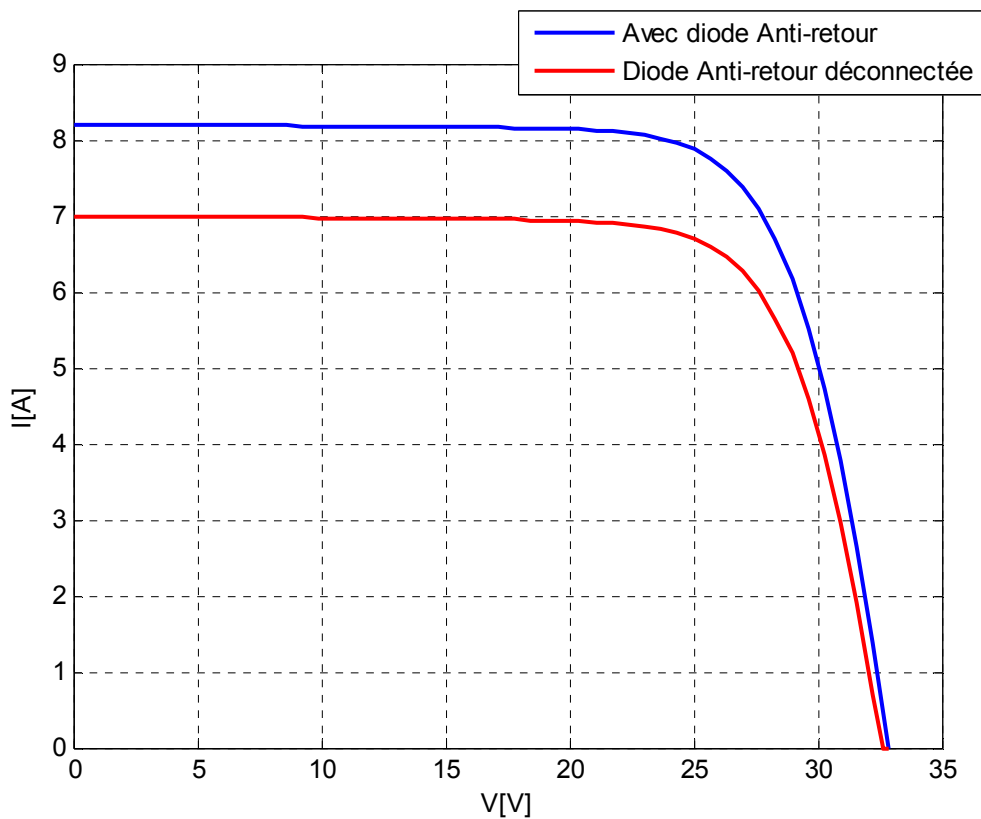


Figure III-13 : résultats de simulation de diode anti-retour déconnectée.

### **III.6. Conclusion :**

Dans cette dernière chapitre après avoir défini chaque composant de la chaîne de conversion PV et ses rôles dans les chapitres précédentes nous avons présenté les défauts principaux de ce système ainsi que les différentes méthodes électriques et non-électriques les plus utilisées dans le diagnostic et la localisation des défauts au niveau d'un générateur, et dans la dernière partie à l'aide de la modélisation d'un générateur sain dans le 3<sup>ème</sup> chapitre on a parlé de quelques résultats de simulation des défauts sous l'environnement Matlab /Simulink .

## **Conclusion générale**

Dans le cadre du travail de ce mémoire, on s'est principalement intéressé à la détection et à la localisation guidée par les différentes méthodes de diagnostic de défauts développées et qui sont rapportées dans la littérature, une approche de diagnostic a été proposée par l'auteur, des défauts du générateur PV par l'analyse de la caractéristique courant-tension et l'identification des symptômes provoquant de mauvaises performances tel que détérioration des composants de systèmes de protection des panneaux photovoltaïques essentiellement les deux diodes : by-pass et anti retour .

Le premier chapitre : a été consacré aux états de l'art sur les installations PV

Le deuxième chapitre : nous avons expliqué la chaîne de conversion PV raccordée au réseau

Le troisième chapitre a été consacré à la modélisation et la simulation sous Matlab/Simulink sur le fonctionnement d'un générateur sain avec quelques caractéristiques nécessaires.

Le chapitre quatre a porté sur les défauts dans une première partie et le diagnostic des défauts dans une deuxième partie et la simulation dans une dernière partie.

## Bibliographie

- [1] BRESSAN Michael « Développement d'un outil de supervision et de contrôle pour une installation solaire photovoltaïque » université de perpignan , 2014 thèse de doctorat
- [2] Long BUN « Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV » université de grenoble 2011 , thèse de doctorat
- [3] ouada mehdi « ANALYSE , CONCEPTION ET OPTIMISATION DES SYSTEMES DE COMMANDE RELATIVE AUX ENERGIES RENOUVELABLES » UBMA 2017 ,thèse de doctorat
- [4] chebabhi ardjourna « Etude d'identification et localisation des défauts d'un générateur photovoltaïque » 2016 , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, master
- [5] Alain Ricaud, « Modules et systèmes photovoltaïques », Sept 2008, Président de Screen Solar, Professeur Associé à l'Université de Savoie.
- [6] T. Ikegami, T. Maezono, F. Nakanishi, "Estimation of equivalent circuit parameters of PV module and its application to optimal operation of PV system", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 67 (2001), Page(s): 389-395
- [7] M.C. Scharber, D. Wuhlbacher, M. Koppe, P. Denk, C. Waldauf , A.J. Heeger, C.L. Brabec, *Adv. Mater.*, 18 (2006) 789-794.
- [8] C.P. Chen, S.H. Chan, T.C. Chao, C. Ting, B.T. Ko, *J. Am. Chem . Soc.*, 130 (2008) 12828-12833
- [9] Amine Attou, Ahmed Massoum, Mohammed Chadli “Comparison of two tracking methods for photovoltaic system” *Rev. Roum. Sci. Techn. R Électrotechn. et Énerg.*, 60, 2, p. 205-214, Bucarest, 2015.
- [10] Salim Bouchakour et al. “Direct power control of grid connected photovoltaic system”, *Rev. Roum. Sci. Techn. R Électrotechn. et Énerg.*, 59, 1,p. 57-66, Bucarest, 2014
- [11] M.FRANCHET “Réflectométrie appliquée à la détection de défauts non francs dans les torons de câbles” thèse de doctorat UNIV paris EST
- [12] Cours de “L'ANALYSE PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE” rédigé par MR.Bouras UBM annaba 2019/2020.
- [13] G. B. Alers, "Photovoltaic Failure Analysis: Techniques for Microelectronics and Solar," in *PV Module Reliability Workshop*, Colorado, USA, 2011
- [14] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons, 2011.

[15] M. Benhaddadi, G. Olivier, "Dilemmes Energétiques", Presses de l'Université du Québec PUQ, 2008.

[16] M.Khelif , Bendali Braham Mounir , " étude et simulation d'une chaine de production photovoltaïque " UBM Annaba , mémoire de master ,2018

[17] Saad Saoud Merwan , "Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole" thèse de doctorat ,UBM Annaba ,2016/2017.